

Волинський національний університет
імені Лесі Українки

ПРОБЛЕМИ ХІМІЇ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Випуск 2



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Марушко Лариса Петрівна – доктор педагогічних наук, доцент, декан факультету хімії та екології Волинського національного університету імені Лесі Українки (головний редактор);

Анічкіна Олена Василівна – кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри хімії Житомирського державного університету імені Івана Франка;

Бедункова Ольга Олександрівна – доктор біологічних наук (03.00.16 – Екологія), доцент, професор кафедри екології, технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства Національного університету водного господарства та природокористування;

Боярин Марія Володимирівна – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Гулай Любомир Дмитрович – доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Гулай Ольга Іванівна – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри цифрових освітніх технологій та кафедри харчових технологій та хімії Луцького національного технічного університету;

Казакова Наталія Вікторівна – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри педагогіки Хмельницької гуманітарно-педагогічної академії;

Калаур Світлана Миколаївна – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри соціальної роботи та менеджменту соціокультурної діяльності, керівник Центру післядипломної освіти Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка;

Караїм Ольга Анатоліївна – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Клименко Олександр Миколайович – доктор сільськогосподарських наук (03.00.16 – Екологія), професор, професор кафедри екології, технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства Національного університету водного господарства та природокористування;

Когут Юрій Миколайович – кандидат хімічних наук, старший викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Лукашук Микола Миколайович – кандидат педагогічних наук, викладач з предметів хімія і біологія Комунального закладу вищої освіти «Рівненська медична академія» Рівненської обласної ради;

Марчук Олег Васильович – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Піскач Людмила Василівна – кандидат хімічних наук, професор, професор кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Романишина Оксана Ярославівна – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри інформатики та методики навчання Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка;

Романюк Ярослав Євгенійович – PhD, керівник наукової групи Швейцарської федеральної лабораторії матеріалознавства і технологій (ЕМРА) (Швейцарія);

Савицька Вікторія Василівна – кандидат педагогічних наук, старший викладач кафедри освітології і педагогіки Західноукраїнського національного університету

Салісва Леся Миколаївна – кандидат хімічних наук, доцент кафедри органічної та фармацевтичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Сливка Наталія Юрївна – доктор хімічних наук, доцент, завідувач кафедри органічної та фармацевтичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Смітюх Олександр Вікторович – кандидат хімічних наук, старший викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Сонько Сергій Петрович – доктор географічних наук (08.00.06 – Економіка природо-користування та охорони навколишнього середовища), професор, завідувач кафедри екології та безпеки життєдіяльності Уманського національного університету садівництва.

Стучинська Наталія Василівна – доктор педагогічних наук, кандидат фізико-математичних наук, професор, професор кафедри медичної і біологічної фізики та інформатики Національного медичного університету ім. О.О. Богомольця.

Тюріна Валентина Олександрівна – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри соціології та психології Харківського національного університету внутрішніх справ.

Журнал ухвалено до друку Вченою радою
Волинського національного університету імені Лесі Українки
26 червня 2025 р., протокол № 8

Науковий журнал «Проблеми хімії та сталого розвитку» зареєстровано Національною радою України
з питань телебачення і радіомовлення (Рішення № 1834 від 21.12.2023 року. Ідентифікатор медіа: R30-02341)

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Волинський національний університет імені Лесі Українки
(просп. Волі, буд. 13, м. Луцьк Волинської обл., 43025, post@vnu.edu.ua, тел. (0332) 720123).

Періодичність: 4 рази на рік.

«Проблеми хімії та сталого розвитку» включено до Переліку наукових фахових видань України категорії Б
у галузі знань природничі науки (спеціальності Е2 – Екологія; Е3 – Хімія),
педагогічні науки А1 – Освітні, педагогічні науки; А5 – Професійна освіта (за спеціалізаціями))
відповідно до Наказу МОН України № 735 від 29 червня 2021 року (додаток 4),
Наказу МОН України № 1166 від 23 грудня 2022 року (додаток 3)

Офіційний сайт видання: www.journals.vnu.volyn.ua/index.php/chemistry

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com
від польської компанії Plagiat.pl.

ISSN 2786-4669 (Print)
ISSN 2786-4677 (Online)

© Волинський національний університет імені Лесі Українки, 2025

ХІМІЯ

УДК 577.118-022.532:542.913]:628.31](045)

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-1>

Наталія ДУШЕЧКІНА

кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300

ORCID: 0000-0002-4203-7122

Олена КОЧУБЕЙ

доктор філософії, викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300

ORCID: 0000-0002-5047-6694

Бібліографічний опис статті: Душечкіна, Н., Кочубей, О. (2025). Екологічно орієнтований неорганічний синтез наноматеріалів на основі TiO_2 для очищення стічних вод. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 3–8, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-1>

ЕКОЛОГІЧНО ОРІЄНТОВАНИЙ НЕОРГАНІЧНИЙ СИНТЕЗ НАНОМАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ TiO_2 ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

У статті розглянуто актуальні підходи до екологічно орієнтованого синтезу наноматеріалів на основі діоксиду титану (TiO_2), які можуть бути ефективно використані для очищення стічних вод від органічних забруднювачів. З огляду на зростаючі екологічні вимоги до хімічних технологій, особливу увагу приділено так званому «зеленому синтезу» – способу отримання наноматеріалів із залученням природних відновників, екстрактів рослинного походження та нетоксичних розчинників. Такий підхід дозволяє мінімізувати негативний вплив на довкілля під час виробництва фотокаталітично активних матеріалів.

Описано процес одержання наночастинок TiO_2 з використанням екстрактів зеленого чаю, кори верби та інших природних компонентів, що служать водночас відновниками та стабілізаторами. Отримані наноструктури характеризуються високою питомою поверхнею, однорідним розподілом частинок і стабільністю фотокаталітичних властивостей.

Проведені дослідження фотокаталітичної активності свідчать про високу ефективність синтезованих матеріалів у процесі деградації органічних барвників, зокрема метиленового синього, під дією УФ-випромінювання. Порівняння з традиційними методами синтезу вказує на переваги «зеленого» підходу з точки зору енергоощадності, безпеки й екологічної доцільності.

У підсумку, автори обґрунтовують доцільність подальшого впровадження таких наноматеріалів у технології очищення стічних вод та підкреслюють важливість розвитку хімії в контексті сталого розвитку й охорони навколишнього природного середовища.

Ключові слова: неорганічний синтез, наноматеріали, очищення, стічні води.

Nataliia DUSHECHKINA

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, and Ecology, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID: 0000-0002-4203-7122

Olena KOCHUBEI

Doctor of Philosophy, Lecturer at the Department of Chemistry and Ecology, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID: 0000-0002-5047-6694

To cite this article: Dushechkina, N., Kochubei, O. (2025). Ekologichno orientovanyi neorhanichniy syntez nanomaterialiv na osnovi TiO_2 dlia ochyshchennia stichnykh vod [Ecologically oriented inorganic synthesis of TiO_2 -based nanomaterials for wastewater treatment]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 3–8, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-1>

ECOLOGICALLY ORIENTED INORGANIC SYNTHESIS OF TiO_2 -BASED NANOMATERIALS FOR WASTEWATER TREATMENT

The article considers current approaches to environmentally friendly synthesis of nanomaterials based on titanium dioxide (TiO_2), which can be effectively used for wastewater treatment from organic pollutants. Given the growing environmental requirements for chemical technologies, special attention is paid to the so-called “green synthesis” – a method of obtaining nanomaterials using natural reducing agents, plant extracts and non-toxic solvents. This approach allows minimizing the negative impact on the environment during the production of photocatalytically active materials.

The process of obtaining TiO_2 nanoparticles using green tea extracts, willow bark and other natural components that serve as reducing agents and stabilizers is described. The obtained nanostructures are characterized by a high specific surface area, uniform particle distribution and stable photocatalytic properties.

The conducted studies of photocatalytic activity indicate the high efficiency of the synthesized materials in the degradation of organic dyes, in particular methylene blue, under the influence of UV radiation. Comparison with traditional synthesis methods indicates the advantages of the «green» approach in terms of energy saving, safety and environmental feasibility.

In conclusion, the authors justify the feasibility of further implementation of such nanomaterials in wastewater treatment technology and emphasize the importance of the development of chemistry in the context of sustainable development and environmental protection.

Key words: inorganic synthesis, nanomaterials, purification, wastewater.

Актуальність проблеми. Інтенсивний розвиток промисловості, сільського господарства та урбанізації супроводжується зростанням обсягів забруднення водного середовища, особливо органічними речовинами антропогенного походження – барвниками, фармацевтичними препаратами, нафтопродуктами, синтетичними мийними засобами тощо. Ці сполуки часто виявляються стійкими до біологічного розкладу, що унеможливає їх повне усунення традиційними методами очищення стічних вод. Як наслідок, вони накопичуються у водних екосистемах, впливаючи на біоту, змінюючи трофічні зв'язки та спричиняючи ризики для здоров'я людини.

На цьому тлі дедалі більшої актуальності набуває пошук нових ефективних, енергоощадних і екологічно безпечних підходів до очищення водних середовищ. Одним з найбільш перспективних методів є фотокаталітична деградація органічних забруднювачів із використанням наноматеріалів, зокрема на основі діоксиду титану (TiO_2). TiO_2 привертає увагу дослідників завдяки своїм унікальним властивостям: хімічній стабільності, фотокаталітичній активності, низькій токсичності та доступності. Однак промислові методи синтезу TiO_2 часто передбачають використання токсичних реагентів, високу енергоємність і утворення побічних шкідливих продуктів.

У цьому контексті актуальним є розвиток «зелених» технологій неорганічного синтезу, які дозволяють зменшити екологічне навантаження на довкілля. Застосування природних відновників, зокрема екстрактів рослинного походження, для синтезу наноматеріалів відкриває нові можливості у створенні безпечних і ефективних фотокаталізаторів. Такі підходи не лише сприяють розвитку хімічної науки в руслі сталого розвитку, а й створюють умови для широкого практичного використання результатів у технологіях очищення води.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється розробці екологічно безпечних методів синтезу наноматеріалів на основі діоксиду титану (TiO_2) для очищення стічних вод. Традиційні хімічні та фізичні методи отримання TiO_2 часто пов'язані з використанням токсичних реагентів, високими енергетичними витратами та несприятливим впливом на довкілля. У відповідь на ці виклики зростає інтерес до «зеленого» синтезу, який використовує природні біомолекули, такі як екстракти рослин, для отримання наночастинок TiO_2 . Цей підхід не лише знижує екологічне навантаження, але й сприяє отриманню наноматеріалів з покращеними функціональними характеристиками.

Огляд останніх досліджень свідчить про успішне використання різноманітних рослинних екстрактів для біогенного синтезу наночастинок TiO_2 . Наприклад, застосування екстракту листя *Impatiens rothii* Hook.f. дозволило ефективно синтезувати наночастинки TiO_2 з високою фотокаталітичною активністю, придатною для деградації органічних забруднювачів у воді. Інше дослідження продемонструвало, що використання екстрактів різних рослин сприяє отриманню наночастинок TiO_2 з покращеними антибактеріальними властивостями, що розширює їх застосування у водоочищенні та медичних матеріалах.

Крім того, розглядаються мікробні методи синтезу наночастинок TiO_2 , які залучають бактерії, гриби та водорості як біокаталізатори. Ці біологічні агенти сприяють формуванню наночастинок зі специфічними морфологічними та функціональними характеристиками, що підвищує їх ефективність у фотокаталітичних процесах очищення води (Козак, 2022).

Загалом, сучасні дослідження підтверджують перспективність «зеленого» синтезу наноматеріалів TiO_2 для екологічно безпечного та ефективного очищення стічних вод. Подальший розвиток цих технологій сприятиме зменшенню екологічного навантаження та впровадженню сталих методів водоочищення.

Метою дослідження є наукове обґрунтування доцільності застосування екологічно орієнтованих підходів до неорганічного синтезу наноматеріалів на основі діоксиду титану (TiO_2) з використанням природних біоагентів, а також оцінка ефективності одержаних матеріалів у процесі фотокаталітичного очищення стічних вод від органічних забруднювачів.

Виклад основного матеріалу дослідження. У межах проведеного дослідження було реалізовано екологічно орієнтований підхід до неорганічного синтезу наноматеріалів на основі діоксиду титану (TiO_2), який є одним із найперспективніших фотокаталізаторів для очищення водного середовища від органічних забруднювачів. Зростання техногенного навантаження на довкілля, зокрема водні ресурси, зумовлює необхідність пошуку ефективних, безпечних і сталих рішень для деградації шкідливих органічних речовин, які потрапляють у стоки внаслідок промислової, сільськогосподарської та побутової діяльності.

До таких речовин належать синтетичні барвники, фармацевтичні залишки, поверхнево-активні речовини, фенольні сполуки, які виявляють стійкість до біодеградації та акумулюються в екосистемах, завдаючи шкоди біоті та здоров'ю людини.

Діоксид титану вже тривалий час вивчається як функціональний матеріал, здатний ініціювати фотокаталітичні процеси під дією ультрафіолетового випромінювання. При цьому на поверхні наночастинок TiO_2 утворюються активні форми кисню ($\cdot\text{OH}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$), які здатні розщеплювати складні органічні молекули до простих, нетоксичних мінералізованих продуктів (CO_2 , H_2O). Завдяки цим властивостям TiO_2 широко застосовується у системах очищення води, повітря, у самоочищувальних покриттях та антимікробних матеріалах. Водночас, промислові методи синтезу TiO_2 мають суттєві обмеження з точки зору екологічної безпеки: вони потребують агресивних розчинників, високих температур і часто супроводжуються утворенням шкідливих побічних продуктів. Це актуалізує необхідність розробки альтернативних, енергоощадних та безпечних для довкілля методів одержання наноматеріалів – зокрема, шляхом використання так званого «зеленого» синтезу (Середа, 2021), (Романенко, 2021).

«Зелений» синтез наноматеріалів передбачає застосування природних біологічних агентів – рослинних екстрактів, мікроорганізмів, біомолекул – як відновників, стабілізаторів або темплатів. Рослинні екстракти містять поліфеноли, флавоноїди, амінокислоти, вуглеводи, які здатні регулювати процес нуклеації та росту наночастинок без потреби у шкідливих хімічних реагентах. Цей підхід забезпечує не лише зменшення токсичності процесу, але й дозволяє формувати наночастинки зі специфічною морфологією та високою стабільністю.

У цьому дослідженні як титановмісну сполуку було обрано титановий ізопропоксид ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$), який відзначається високою реакційною здатністю у водному середовищі. У ролі природних стабілізуючих і відновлюючих агентів використовувалися водні екстракти листя зеленого чаю (*Camellia sinensis*), кори верби (*Salix alba*) та лаванди (*Lavandula angustifolia*). Усі ці рослинні компоненти містять потужні антиоксиданти, зокрема катехіни, поліфенольні кислоти, таніни, які виконують

функції контролю росту наночастинок і стабілізації їх колоїдної форми.

Синтез проводився шляхом повільного додавання 0,1М розчину титанової сполуки до підігрітого до 70 °С рослинного екстракту при постійному перемішуванні. У результаті гідролізу утворювався колоїдний гель, який витримували протягом двох годин, після чого осад відокремлювали центрифугуванням, промивали дистильованою водою і висушували при температурі 80 °С. На відміну від традиційного золь-гель методу, у цьому випадку не використовувалися органічні розчинники (етанол, ацетон) або кислотно-лужні каталізатори, що значно знижувало токсичність процесу. Крім того, термічна обробка не перевищувала 100 °С, що дає змогу розглядати метод як енергоефективний.

Фізико-хімічна характеристика одержаних наночастинок проводилася із застосуванням рентгенофазового аналізу, електронної мікроскопії та спектроскопії у ультрафіолетовому діапазоні. За даними XRD-аналізу встановлено, що у більшості зразків формується кристалічна фаза анатазу, яка характеризується найвищою фотокаталітичною активністю серед трьох основних модифікацій TiO_2 (анатаз, рутил, бронзит). Електронна мікроскопія (SEM, TEM) показала, що наночастинок мають майже сферичну форму з діаметром 20–30 нм та незначною агрегацією. Спектрофотометрія у діапазоні 200–800 нм підтвердила інтенсивне поглинання у УФ-області, що є передумовою ефективного фотокаталітичного використання.

Фотокаталітичну активність наноматеріалів оцінювали за моделлю деградації метиленового синього – стандартного органічного барвника, стійкого до біодеструкції. Зразки розчину барвника у концентрації 10 мг/л піддавали дії ультрафіолетового випромінювання (лампа 125 Вт, $\lambda = 365$ нм) у присутності 50 мг нанокаталізатора. Дослідження тривало 90 хвилин з відбором проб кожні 15 хв для спектрофотометричного аналізу зменшення інтенсивності забарвлення. У результаті встановлено, що зразки на основі зеленого чаю демонструють найвищу фотокаталітичну ефективність – до 96 % деградації барвника. Зразки, синтезовані з екстрактом кори верби, показали ефективність на рівні 88 %, а лаванди – до 91 %. Комерційний зразок TiO_2 (Degussa P25) у тих самих умовах продемонстрував 93 % ефективності.

Додатково було проведено повторні цикли очищення з тими самими зразками наночастинок. Упродовж трьох циклів використання фотокаталітична активність зразків зберігалася на рівні понад 85 %, що свідчить про їх стабільність та придатність до багаторазового застосування. Важливо зазначити, що після очищення каталізатори не вимагали регенерації чи додаткової обробки, що значно спрощує їх практичне використання.

Отримані результати свідчать про те, що «зелений» синтез TiO_2 на основі природних екстрактів не лише відповідає принципам екологічної безпеки, але й забезпечує формування наноматеріалів з високою фотокаталітичною активністю. Такий підхід дозволяє створювати дешеві, доступні та енергоощадні технології очищення водного середовища, які можуть бути впроваджені як у централізованих, так і в децентралізованих системах. У перспективі доцільним є подальше дослідження впливу різних типів рослинних екстрактів, умов синтезу, а також можливість інтеграції біогенних наночастинок у полімерні або композитні фільтраційні матеріали з метою підвищення ефективності довготривалого використання в умовах реального навантаження.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження підтвердило ефективність та екологічну доцільність застосування «зеленого» підходу до синтезу наноматеріалів на основі діоксиду титану для цілей фотокаталітичного очищення водного середовища. Синтезовані наночастинок TiO_2 із застосуванням водних екстрактів рослинного походження (зокрема зеленого чаю, кори верби та лаванди) продемонстрували стабільні морфологічні характеристики, нанорозміри частинок, наявність активної фази анатазу та високу фотокаталітичну активність у модельних умовах деградації органічного забруднювача – метиленового синього. Найвищу ефективність досягнуто для наночастинок, отриманих із використанням екстракту зеленого чаю – до 96 % знебарвлення за 90 хвилин фотолізу.

Отримані результати свідчать про практичну придатність біогенних наноматеріалів для впровадження в системи очищення стічних вод, зокрема в умовах, що не дозволяють застосування енергоємних або хімічно агресивних технологій. Синтез у м'яких умовах (без високих

температур і токсичних реагентів) відкриває можливості масштабування процесу в промислових або напівпромислових умовах, включно з використанням доступної сировини місцевого походження. Високий рівень стабільності матеріалів у багаторазовому використанні підтверджує їх потенціал для повторного застосування без втрати функціональних властивостей.

У контексті реалізації принципів сталого розвитку дана робота демонструє можливість поєднання хімічної інновації та екологічної відповідальності. Біогенний синтез TiO_2 виступає як приклад інтеграції екологічно чистих методів у класичну неорганічну хімію, спрямовану на вирішення прикладних завдань з охорони навколишнього середовища.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні спектра біологічних агентів для синтезу, вивченні взаємодії наночастинок з різними типами забруднювачів (антибіотиками, пестицидами, нафтопродуктами), а також в інтеграції біогенних TiO_2 у композиційні системи, зокрема полімерні та керамічні мембрани, з метою створення ефективних і доступних фільтраційних матеріалів нового покоління. Не менш важливим є вивчення поведінки таких наноматеріалів у реальних умовах експлуатації, у присутності багатокомпонентних сумішей забруднювачів, змінних температур і рН, що наблизить лабораторні розробки до практичної імплементації у водоочисні технології.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Цісар О., Піскач Л., Бабіжецький В., Левицький В., Котур Б., Марушко Л., Олексюк І., Парасюк О. Фазові рівноваги в системі $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3-\text{GeSe}_2$ при 520 К. *Вісн. Львів. у-ту. Сер. хімічна*. 2018. 59(10). С. 46–52.
10. Козак М. Д., Гладкий С. І., Мацюк В. М. Біогенний синтез наночастинок металів: екологічні аспекти. *Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Серія: Хімія*. 2022. 60. С. 54–62.
2. Климчук О., Тимченко Л., Семенюк І. Синтез та фотокаталітичні властивості наночастинок TiO_2 , отриманих з використанням рослинних екстрактів. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2020. 11(1). С. 89–95.
3. Романенко В. М., Коваленко Л. П., Громова І. С. Екологічна безпека та технології очищення стічних вод із використанням наноматеріалів. *Екологічні науки*. 2021. 4(35). С. 44–51.
4. Ковальчук О. І., Савчук О. С., Литвиненко Л. М. Зелені методи синтезу наноматеріалів: огляд сучасних підходів. *Вісник Київ. ун-ту. Сер. хімія*. 2022. 65(2). С. 28–36.
5. Бондаренко М. І., Тарасюк Г. Г., Чорна І. П. Застосування біогенних оксидів металів для деградації барвників у водному середовищі. Теоретичні та прикладні проблеми хімії. 2021. 3(1). С. 15–22. (Бондаренко, 2021; Гуменюк, 2022).
6. Павленко С. В., Ткаченко А. І., Степаненко А. В. Морфологія наночастинок TiO_2 , синтезованих за участі природних антиоксидантів. *Наукові записки НаУКМА. Хімічні науки*. 2019. 206. С. 72–78.
7. Чайка Т. С., Демчук Л. І., Шевчук І. В. Вплив умов синтезу на фазовий склад наноструктурованого TiO_2 . *Доповіді НАН України*. 2020. 3. С. 89–93.
8. Гуменюк С. В., Мельничук Ю. В., Рибак О. О. Перспективи застосування оксидів металів у наноформі для екологічного моніторингу. *Екологічна безпека*. 2022. 1(29). С. 112–119.
9. Середа Н. В., Гончарук В. К. Фотокаталітичне очищення води від органічних забруднювачів: огляд сучасних технологій. *Хімія і технологія води*. 2021. 43(5). С. 67–76.

REFERENCES:

1. Tsisar, O., Piskach, L., Babizhetskyi, V., Levytskyi, V., Kotur, B., Marushko, L., Oleksyuk, I., Parasyuk, O. (2018). Fazovi rivnovahy v systemi $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3-\text{GeSe}_2$ pry 520 K. [Phase equilibria in the system $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3-\text{GeSe}_2$ at 520 K]. *Visn. Lviv. u-tu. Ser. khimichna – Bulletin of Lviv University. Chemistry series*, 59(10), 46–52. [in Ukrainian].
2. Klymchuk, O., Tymchenko, L., Semeniuk, I. (2020). Syntez ta fotokatalitychni vlastyvyosti nanochastynok TiO_2 , otrymanykh z vykorystannyam roslynnykh ekstraktiv. [Synthesis and photocatalytic properties of TiO_2 nanoparticles obtained using plant extracts]. *Khimiya, fizyka ta tekhnolohiia poverkhni – Chemistry, Physics and Technology of Surface*, 11(1), 89–95. [in Ukrainian].
3. Romanenko, V. M., Kovalenko, L. P., Hromova, I. S. (2021). Ekolohichna bezpeka ta tekhnolohii ochyshchennia stichnykh vod iz vykorystannyam nanomaterialiv. [Ecological safety and wastewater treatment technologies using nanomaterials]. *Ekologichni nauky – Ecological Sciences*, 4(35), 44–51. [in Ukrainian].
4. Kovalchuk, O. I., Savchuk, O. S., Lytvynenko, L. M. (2022). Zeleni metody syntezy nanomaterialiv: ohliad suchasnykh pidkhodiv. [Green synthesis methods of nanomaterials: a review of current approaches]. *Visnyk Kyiv. u-tu. Ser. khimiia – Bulletin of Kyiv University. Chemistry series*, 65(2), 28–36. [in Ukrainian].

5. Bondarenko, M. I., Tarasiuk, H. H., Chorna, I. P. (2021). Zastosuvannia biohennykh oksydiv metaliv dlia dyhradatsii barvnykiv u vodnomu seredovyshchi. [Application of biogenic metal oxides for degradation of dyes in aqueous medium]. *Teoretychni ta prykladni problemy khimii – Theoretical and Applied Problems of Chemistry*, 3(1), 15–22. [in Ukrainian].
6. Pavlenko, S. V., Tkachenko, A. I., Stepanenko, A. V. (2019). Morfolohiia nanochastynok TiO_2 , syntezyovanykh za uchasti pryrodnykh antyoksydantiv. [Morphology of TiO_2 nanoparticles synthesized with the participation of natural antioxidants]. *Naukovi zapysky NaUKMA. Khimichni nauky – Scientific Notes of NaUKMA. Chemical Sciences*, 206, 72–78. [in Ukrainian].
7. Chaika, T. S., Demchuk, L. I., Shevchuk, I. V. (2020). Vplyv umov syntezy na fazovyi sklad nanostrukturovanoho TiO_2 . [Influence of synthesis conditions on phase composition of nanostructured TiO_2]. *Dopovidi NAN Ukrainy – Reports of NAS of Ukraine*, 3, 89–93. [in Ukrainian].
8. Humeniuk, S. V., Melnychuk, Yu. V., Rybak, O. O. (2022). Perspektyvy zastosuvannia oksydiv metaliv u nanoformi dlia ekolohichnoho monitorynhu. [Prospects for the use of metal oxides in nanoform for environmental monitoring]. *Ekologichna bezpeka – Environmental Safety*, 1(29), 112–119. [in Ukrainian].
9. Sereda, N. V., Honcharuk, V. K. (2021). Fotokatalitychne ochyshchennia vody vid orhanichnykh zabrudniuvachiv: ohliad suchasnykh tekhnolohii. [Photocatalytic water purification from organic pollutants: a review of modern technologies]. *Khimia i tekhnolohiia vody – Chemistry and Technology of Water*, 43(5), 67–76. [in Ukrainian].
10. Kozak, M. D., Hladkyi, S. I., Matsiuk, V. M. (2022). Biohennyi syntezy nanochastynok metaliv: ekolohichni aspekty. [Biogenic synthesis of metal nanoparticles: environmental aspects]. *Visnyk Kharkiv. nats. u-tu im. V. N. Karazina. Seriya: Khimiia – Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Chemistry series*, 60, 54–62. [in Ukrainian].

УДК 547.922.5 + 532.783

DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-2>

Віталій ЛИСТВАН

кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська, 40, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0002-8366-2813

Бібліографічний опис статті: Листван, В. (2025). Реакція Віттіга як перспективний метод одержання нових халконів. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 9–16, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-2>

РЕАКЦІЯ ВІТТИГА ЯК ПЕРСПЕКТИВНИЙ МЕТОД ОДЕРЖАННЯ НОВИХ ХАЛКОНІВ

Халкони, що є похідними 1,3-дифенілпропенону та його аналогів, привертають увагу передусім завдяки широкому спектру своєї фізіологічної активності. Терапевтичні властивості низки природних сполук рослинного походження цього класу спонукали до активного одержання і дослідження їх синтетичних аналогів. Зокрема, халконам властива висока протизапальна, антибактеріальна та антивірусна, а також протипухлинна та антигіперглікемічна активність. Їм притаманні також цінні оптичні властивості, зокрема флуоресцентні. Халкони також є цінними напівпродуктами для синтезу органічних сполук інших класів, передусім гетероциклів.

Широкий діапазон практично цінних властивостей вимагає активного пошуку нових шляхів їх синтезу. Реакція Віттіга як метод отримання похідних халконів відома давно, але її можливості і варіанти застосування у цій сфері вивчені недостатньо. Метою даної роботи було одержання нових халконів на основі альдегідів, що містять у складі молекули естерні групи, а також вивчення можливості використання фосфонієвих солей як вихідних сполук, без проміжного виділення алкіліденфосфоранів у вільному стані. З'ясовано, що фосфонієві солі легко взаємодіють з альдегідами у присутності триетиламіну, при цьому дія основи перетворює сіль на алкіліденфосфоран, який в умовах реакції відразу взаємодіє з альдегідом, утворюючи відповідні ненасичені кетони. Цей метод дозволив отримати низку гідроксихалконів, похідних бензоксазину та гетероциклічних аналогів халконів.

Названий метод синтезу однак виявився непридатним для сполук з чутливими до лужного гідролізу групами. У цьому випадку виявилось необхідним застосування попередньо виділених в індивідуальному стані алкіліденфосфоранів. Реакцією стабільних фосфорілідів з альдегідами, що містять естерові групи, отримано низку заміщених халконів, зокрема таких, що містять фрагменти природних сполук – кумарину та піридинкарбонових кислот.

Ключові слова: халкони, алкіліденфосфорани, іліди, фосфонієві солі, реакція Віттіга.

Vitalii LYSTVAN

PhD in Chemistry, Associate Professor at the Department of Chemistry, Zhytomyr Ivan Franko State University, 40 Velyka Berdychivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0002-8366-2813

To cite this article: Lystvan, V. (2025). Reaktsia Wittiga yak perspektyvnyy metod oderzhannia chalkoniv [Wittig reaction as a promising method of the chalcones obtaining]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 9–16, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-2>

WITTIG REACTION AS A PROMISING METHOD OF THE CHALCONES OBTAINING

Chalcones, being the derivatives of 1,3-diphenylpropenone and its analogues are of interest primarily due to the wide spectrum of their physiological activity. The therapeutic properties of a number of plant origin natural compounds of this class caused an active preparation and investigation of their synthetic analogues. Particularly chalcones show high anti-inflammatory, antibacterial and antiviral, as well as antitumor and antihyperglycemic activity. They are also characterized by valuable optical properties, fluorescent by instance. Chalcones are also known as valuable intermediates for the synthesis of other classes organic compounds, primarily heterocycles. A wide range of practically valuable properties requires an active search for new ways of their synthesis. The Wittig reaction as a method for obtaining chalcone derivatives has been known for a long time, but its capabilities and application options in this area have

not been studied sufficiently. Current investigation aims to obtain new chalcones on the base of aldehydes containing ester groups in their molecules as well as to study the possibility of phosphonium salts application as starting compounds, without intermediate isolation of alkylidenephosphoranes. It have been found that phosphonium salts easily interact with aldehydes in the presence of triethylamine, the action of the base converts the salt into alkylidenephosphorane, which under reaction conditions immediately interacts with the aldehyde, forming the corresponding unsaturated ketones. This method allowed to obtain a number of hydroxychalcones, benzoxazinone derivatives and heterocyclic analogues of chalcones. However, the mentioned synthesis method have been found to be unavailable for compounds containing sensitive to alkaline hydrolysis groups. In this case it turned out to be necessary to use alkylidenephosphoranes previously isolated in an individual state. A number of substituted chalcones, particularly those containing fragments of natural compounds – coumarin and pyridinecarboxylic acids – have been obtained by interaction of stable phosphorylides with aldehydes containing ester groups.

Key words: chalcones, alkylidene phosphoranes, ylides, phosphonium salts, Wittig reaction.

Актуальність проблеми й аналіз останніх досліджень і публікацій. Халкони – похідні 1,3-дифенілпропенону та його аналогів – протягом десятиліть привертають до себе увагу хіміків, фармакологів, технологів з огляду на унікальну різнобічність їх цінних властивостей і можливість практичного застосування у різних галузях медицини, техніки, промисловості тощо. Терапевтичне застосування халконів сягає далекого минулого завдяки їх вмісту у лікарських рослинах. Здавна відомі антимикробні, протизапальні, протималярійні, протиракові властивості цього класу сполук. На сьогодні не припиняються активні дослідження фізіологічної активності їх синтетичних аналогів, низку яких уже схвалено для клінічного використання. Наприклад, метохалкон був впроваджений на ринок як жовчогінний препарат, софалкон використовувався як противиразковий та мукопротекторний засіб (Zhuang C. et al., 2017).

Природним і синтетичним халконам притаманна висока протизапальна активність (Mahapatra D. K. et al., 2017), вони виявляють також виражену антибактеріальну (Dan W., Dai J., 2020) та антивірусну (Elkhalifa D. et al., 2021) дію. Антипроліферативна активність деяких халконів робить перспективним їх дослідження як протипухлинних препаратів (Santos M.B. et al., 2017, Yang J. et al., 2023). Даний клас сполук також має потенціал для використання у лікуванні цукрового діабету завдяки своїй антигіперглікемічній активності (Acharjee S. et al., 2018), а також у терапії хвороби Паркінсона (Królicka E., Kieć-Kononowicz K., Łażewska D., 2022).

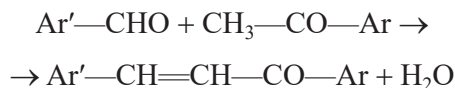
Можливості практичного застосування халконів не обмежуються їх біологічною активністю. Оптичні властивості даних сполук, на відміну від фармакологічних, почали активно

вивчатись порівняно недавно. Показано (Song D.-M., Jung K.-H., 2003), що полііміди, модифіковані залишками халконів у ролі бічних ланцюгів, можуть використовуватись у фотовирівнювальному шарі рідкокристалічних дисплеїв. Наявність спряженої системи електрондонорної та електроноакцепторної груп у поєднанні з ароматичними циклами надає їм флуоресцентних властивостей. Зокрема, халкони, що містять N,N-диметиламіногрупу, досліджувались у ролі флуоресцентних пігментів у медичних і клінічних дослідженнях (Mellado M. et al., 2023).

З'ясовано, що халкони можуть застосовуватись в ролі ініціаторів фотополімеризації (Ibrahim-Ouali M., Dumur F., 2021), причому здатні виконувати цю функцію при порівняно низьких рівнях освітлення і при дії світла видимого діапазону. І, зрештою, даний клас сполук може широко використовуватись в органічному синтезі, передусім для отримання різноманітних гетероциклічних сполук, особливо п'яти- та шестичленних гетероциклів. Халкони можна вважати одними з найкорисніших, легкодоступних проміжних продуктів у гетероциклічному синтезі (Nayak Y.N., Gaonkar S.L., Sabu M., 2023). Наявна у молекулі система спряжених зв'язків C=C та C=O має два електрофільні реакційні центри, що дозволяє їм брати участь у реакціях приєднання шляхом атаки карбонільної групи (приєднання типу 1,2) або за участю β-атома Карбону (приєднання 1,4). Це дає змогу синтезувати різноманітні гетероцикли, перспективні з огляду на їх біологічну активність, таких як піроли, індоли, ізоксазоли, імідазоли, піразоли, індазоли, триазоли, тетразоли, піридини та піримідини (Albuquerque H.M.T. et al., 2014).

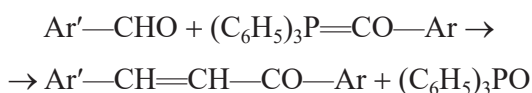
Зрозуміло, що настільки широкий діапазон практичного застосування сполук даного класу

спонукає до пошуку усе нових і ефективних методів їх синтезу. Загально відомим і найбільш широко вживаним завдяки своїй простоті є метод, що полягає на кляйзенівській конденсації альдегідів із заміщеними похідними ацетофенону в умовах лужного каталізу.



Цей метод, однак, не може вважатись універсальним, оскільки він не позбавлений певних обмежень. Зокрема, сильноосновне середовище перешкоджає застосуванню в ролі реагентів сполук, що містять естерні чи інші групи, що в таких умовах піддаються гідролізу. Окрім того, недоліком даної реакції вважається її низька швидкість, що вимагає інколи декількох днів для завершення процесу. В деяких випадках можливі також побічні реакції, що знижують вихід продукту (Gaonkar L. S., Vignesh U. N., 2017). Деякі інші методи (реакція Судзукі, реакція Гека) вимагають складних умов, зокрема, застосування паладієвих чи родієвих катализаторів (Hermange P. et al, 2011).

Серед інших методів отримання заміщених халконів у фаховій літературі згадується також реакція Віттіга, що полягає на взаємодії алкіліденфосфоранів (фосфорілідів) з альдегідами. У даному випадку застосовується фосфоран, що містить кетонну групу $(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{P=CH—CO—Ar}$, і ароматичний альдегід.

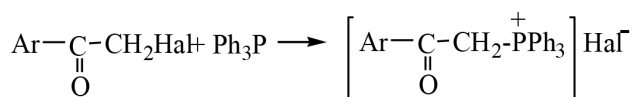


Перші згадки про застосування реакції Віттіга для одержання халкону датуються ще 60-ми роками минулого століття (Bestmann H. J., Arnason B., 1962). З того часу лише у небагатьох публікаціях наводяться дані про цю реакцію як метод синтезу халконів (Faroq S., Ngaini Z., 2019; Donaire-Arias A. et al., 2023), вони стосуються традиційних методик і не вносять у метод істотної новизни за окремими винятками (наприклад, застосування мікрохвильового випромінювання для прискорення реакції (Xu C. et al., 1995)). Викликає подив, чому такий простий і ефективний метод отримання подвійного зв'язку $\text{C}=\text{C}$ не дістав широкого застосування у синтезі ароматичних ненасичених кетонів. Можливо, це пов'язано з тим, що далеко не всі алкіліденфосфорани є стабільними і можуть

бути виділені в індивідуальному стані для подальшого використання в реакції. Останню перешкоду можна було б подолати, використовуючи як вихідні сполуки фосфонієві солі, які в умовах реакції під дією основ перетворюються на іліди, що відразу вступають у реакцію з наявним у реакційній суміші альдегідом. Натомість взаємодію альдегідів безпосередньо зі стабільними фосфоранами можна було б застосувати як м'який метод при взаємодії реагентів, чутливих до лужного середовища.

Мета дослідження. Метою роботи було одержання нових халконів на основі альдегідів, що містять у складі молекули естерні групи, а також вивчення можливості використання фосфонієвих солей як вихідних сполук, без проміжного виділення алкіліденфосфоранів у вільному стані.

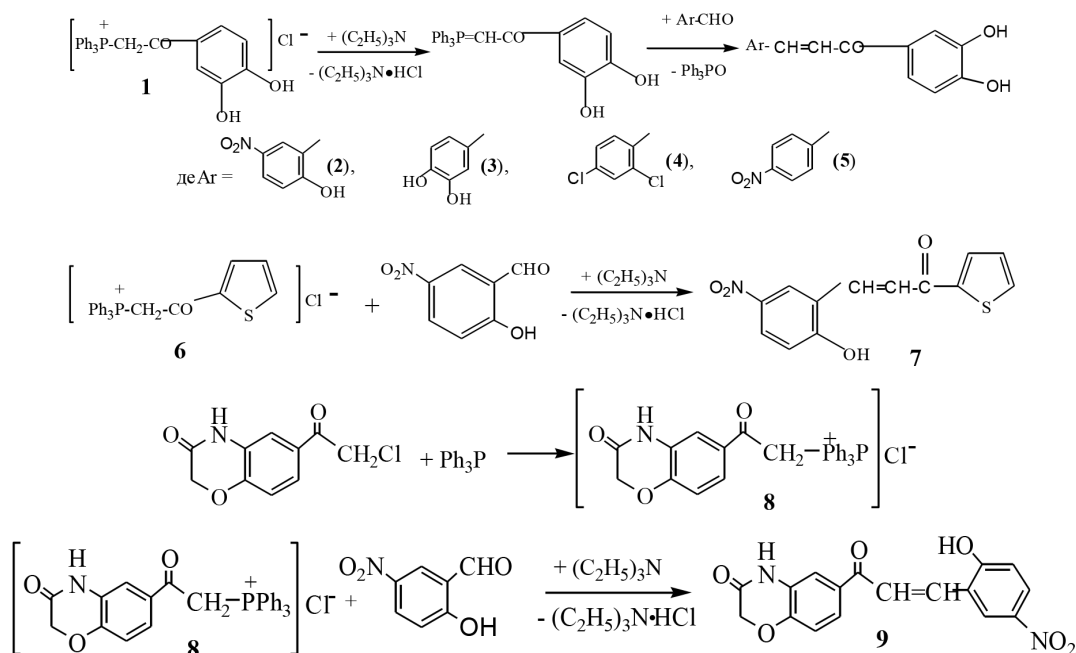
Обговорення результатів. Для синтезу нових халконів ми використовували фосфонієві солі, одержані взаємодією відповідних галогенкетонів з трифенілфосфіном:



Реакція відбувається в м'яких умовах: у випадку бромпохідних – при кімнатній температурі, застосування хлороацетофенонів вимагає нагрівання реакційного розчину протягом ~30хв. Реакцію зручно проводити у малополярних розчинниках (бензен, толуен), у цьому випадку утворена сіль випадає в осад. Отримані фосфонієві солі легко взаємодіють з альдегідами, реакція відбувається при кип'ятінні в спиртовому розчині у присутності невеликого надлишку триетиламіну, при цьому дія основи перетворює сіль на алкіліденфосфоран, який відразу вступає в реакцію з альдегідом, утворюючи відповідні ненасичені кетони.

За цим методом ми одержали, зокрема, похідні солі (**1**) – гідроксихалкони (**2–5**), що завдяки своїй фенольній функції можуть бути цікавими з огляду на їх можливу біологічну активність.

У деяких роботах для перетворення фосфонієвих солей у іліди використовувались такі сильні основи, як алкоголяти чи навіть літійорганічні сполуки. Ми з'ясували, що у згаданій реакції цілком достатньо використовувати триетиламін, який є набагато зручнішим у використанні, оскільки, на відміну від згаданих реагентів, не



вимагає застосування особливих умов (сухі розчинники чи навіть інертна атмосфера). Як розчинники в реакції зручно використовувати нижчі спирти (етанол, 2-пропанол), оскільки в них легко розчиняється вихідна фосфонієва сіль, а продукти реакції випадають в осад.

Аналогічним чином з ароматичними альдегідами реагують інші фосфонієві солі, що містять кетонний фрагмент. Наприклад, використання фосфонієвої солі (6) – похідної тіофену дало змогу отримати гетероциклічний аналог халкону – 1-(2-тієніл)-3-(2-гідрокси-5-нітроєніл)пропенон (7).

Цікавим є також одержання халконів – похідних бензоксазину, синтез яких уже був описаний

раніше (Листван, 2023). Фосфонієва сіль (8) була отримана нами на основі 6-хлороацетил-2Н-1,4-бензоксазин-3(4Н)-она – хлорокетона, що містить бензоксазиноновий цикл. Його взаємодія з трифенілфосфіном призводить до утворення відповідної фосфонієвої солі:

Реакція Віттіга солі (8) з ароматичними альдегідами дозволяє отримувати ненасичені кетони, що містять бензоксазиноновий цикл, наприклад, 1-(4Н-1,4-бензоксазин-2-он-6-іл)-3-(2-гідрокси-4-нітроєніл)пропенон (9):

Спектр ПМР сполуки (9) наведено на рис. 1. Сигнали аліфатичних протонів при подвійному зв'язку зсунуті в область слабого поля (6.8–7.1 м.ч.).

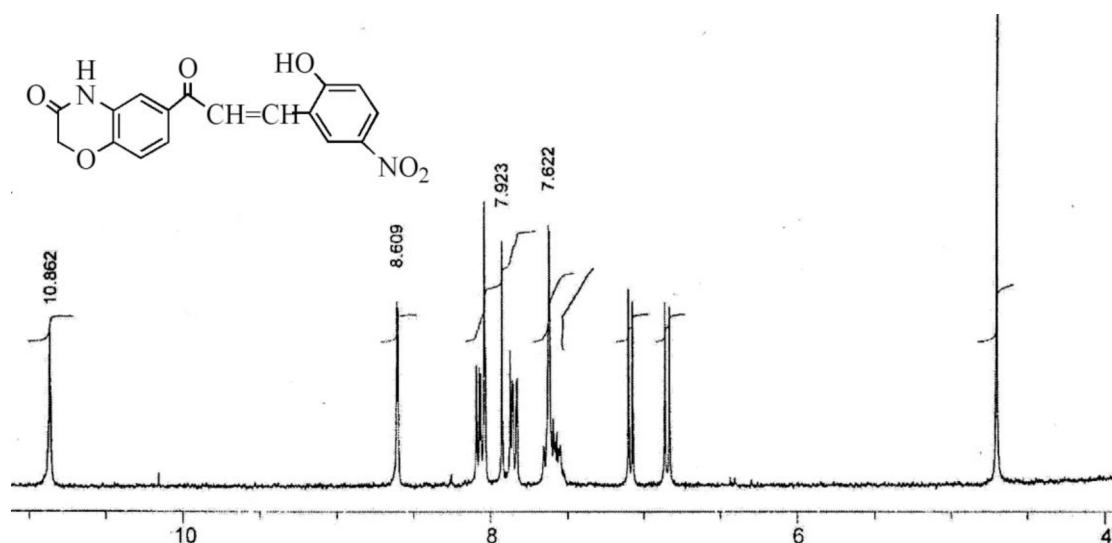
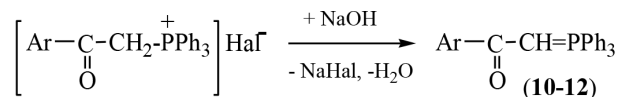


Рис. 1. Спектр ПМР 1-(4Н-1,4-бензоксазин-2-он-6-іл)-3-(2-гідрокси-4-нітроєніл)пропенону (300МГц, ДМСО- D_6)

Реакція відбувається у спиртовому розчині, в ролі основи використовувався триетиламін. Можна застосовувати також водний розчин NaOH (двофазна система).

Хоча описаний метод синтезу (без проміжного виділення алкіліденфосфорану) є простим і зручним, він виявився непридатним для деяких синтезованих нами альдегідів, що містять естерні групи, які гідролізують в основному середовищі. У цих випадках продукти реакції або утворювалися з незначним виходом, або в їх молекулах були відсутні характерні для вихідних альдегідів О-ароїльні фрагменти, що було підтверджено даними ПМР-спектроскопії. Реакція Віттіга з цими альдегідами можлива за умови застосування попередньо виділених в індивідуальному стані алкіліденфосфоранів. У даному випадку це не створювало труднощів, оскільки відповідні іліди є стабільними завдяки наявності в їх молекулах електроноакцепторних карбонільних груп.

Фосфорани (10–12) отримували з відповідних фосфонієвих солей дією лугу на їх спиртові розчини.



де Ar = C₆H₅ (10), 4-Br-C₆H₄ (11), 4-Cl-C₆H₄ (12)

Отримані іліди легко взаємодіють з альдегідами, утворюючи відповідні заміщені халкони. Так, наприклад, 3-метокси-4-(3-нітрофенілоксикарбоніл)бензальдегід взаємодіє з фосфорілідом (10) при нагріванні в CCl₄ протягом ~3 год з утворенням продукту (13).

Фосфоран (11), взаємодіючи з (2-формілфеніл)кумарин-3-карбоксилатом при нагріванні у хлороформі, утворює продукт (15), що поєднує у молекулі фрагмент халкону і природної сполуки – кумарину, що може бути цікавим об'єктом для дослідження біологічної активності.

Її спектр ПМР наведено на рис. 2.

Перспективними з огляду на потенційну біологічну активність можуть також виявитись халкони (16–18), отримані взаємодією трифеніл(4-хлоробензоїл)метиленфосфорану з альдегідами, що містять фрагменти

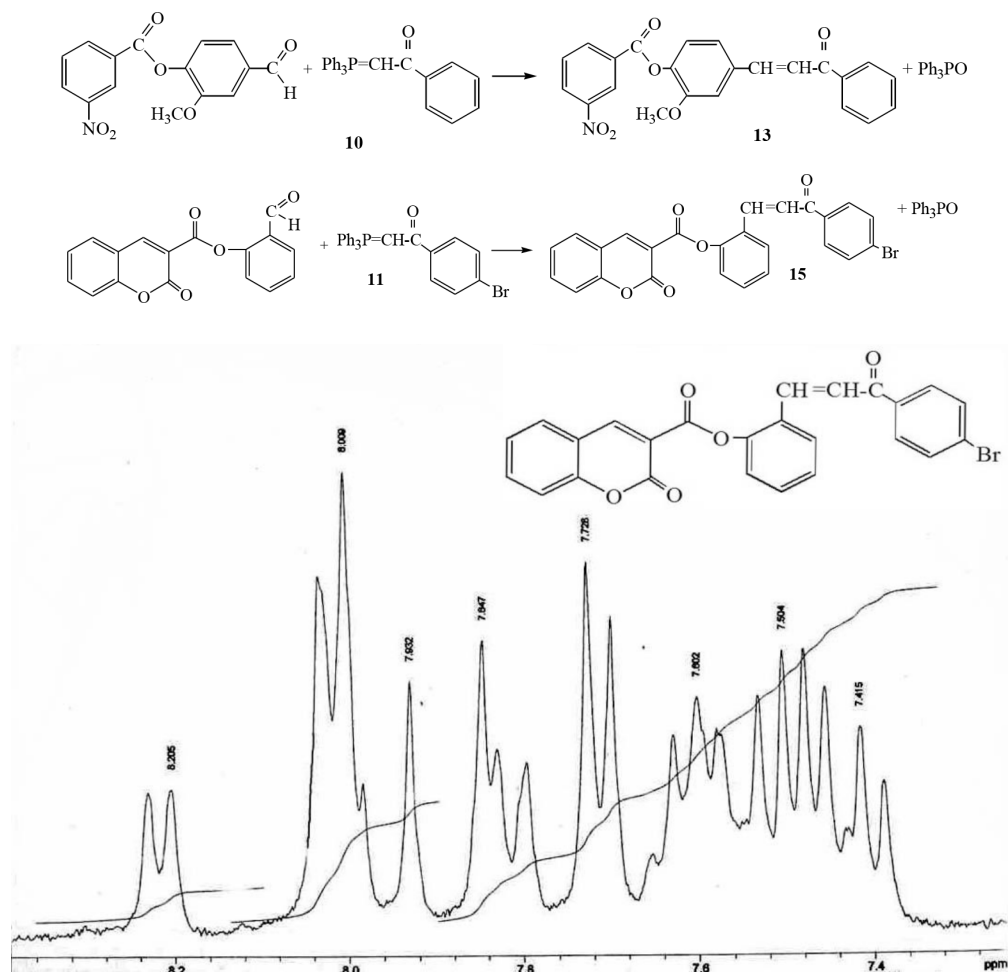
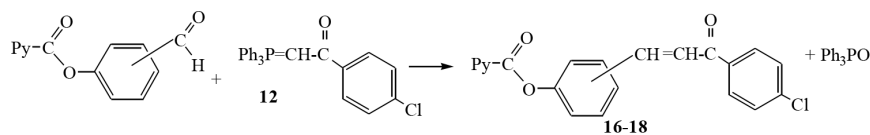


Рис. 2. Спектр ПМР сполуки (15) (300МГц, ДМСО-D6)



де Py = (16, 17), (18); = p-C₆H₄ (16, 18), o-C₆H₄ (17)

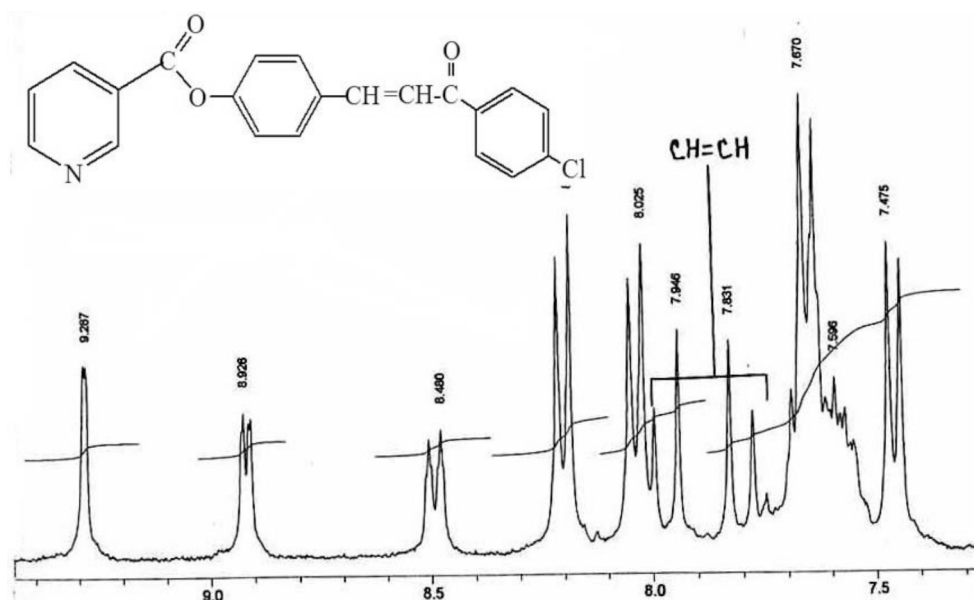


Рис. 3. Спектр ПМР 1-(4хлорофеніл)-3-(4-нікотиноїлоксифеніл)пропенону

нікотинової та ізонікотинової кислот. Продукти (16–18) утворюються з гарним виходом при нагріванні відповідних альдегідів з алкіліденфосфораном протягом 3 год у тетрахлорометані.

Спектр ПМР одного з продуктів реакції (16) наведено на рис. 3.

Висновки. Таким чином, в результаті проведеної роботи показано перспективність застосування реакції Віттіга для одержання

Таблиця 1

Фізико-хімічні характеристики одержаних сполук

№ сп.	Брутто-формула	M_r	Вихід, %	Т пл., °С
1	C ₂₆ H ₂₂ ClO ₃ P	448.9	90	205–210
2	C ₁₅ H ₁₁ NO ₆	301.2	78	154–157
3	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	272.3	48	245
4	C ₁₅ H ₁₀ Cl ₂ O ₃	309.1	67	204–206
5	C ₁₅ H ₁₁ NO ₃	253.3	68	241–243
6	C ₂₄ H ₂₀ BrOSP	467.4	45	247–249
7	C ₁₃ H ₉ NO ₄ S	275.3	71	189–191
8	C ₂₈ H ₂₃ ClNO ₃ P	487.8	93	196
9	C ₁₇ H ₁₂ N ₂ O ₆	340.4	59	270 (розкл)
10	C ₂₇ H ₂₃ O ₂ P	410.4	71	120–122
11	C ₂₇ H ₂₂ O ₂ PBr	489.4	59	161–165
12	C ₂₇ H ₂₂ O ₂ PCl	444.9	72	197–199
13	C ₂₃ H ₁₇ NO ₆	403.4	85	135–136
15	C ₂₅ H ₁₆ O ₅	396.4	63	105–110
16	C ₂₁ H ₁₄ ClNO ₃	363.8	72	168–170
17	C ₂₁ H ₁₄ ClNO ₃	363.8	80	145–146
18	C ₂₁ H ₁₄ ClNO ₃	363.8	62	195

нових заміщених похідних халконів, отримано низку нових ароматичних α , β -ненасичених ароматичних кетонів, у тому числі таких, що містять гетероциклічні фрагменти. З'ясовано, що у багатьох випадках замість алкіліденофосфорану в реакцію з альдегідом можна вводити вихідну фосфонієву сіль, уникнувши стадії виділення відповідного іліду у вільному

стані. Натомість для одержання халконів, що містять естерові фрагменти, даний підхід виявився непридатним через можливість гідролізу таких груп в основному середовищі. Використання вихідних сполук з такими функціональними групами вимагає застосування в реакції попередньо виділеного алкіліденофосорану.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Zhuang C., Zhang W., Sheng C., et al. Chalcone: a privileged structure in medicinal chemistry. *Chemical Reviews*. 2017. Vol. 117, No. 12. P. 7762–7810. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00020>
2. Mahapatra D. K., Bharti S. K., Asati V. Chalcone derivatives: anti-inflammatory potential and molecular targets perspectives. *Current Topics in Medicinal Chemistry*. 2017. Vol. 17, No. 28. P. 3146–3169. DOI: <https://doi.org/10.2174/1568026617666170914160446>
3. Dan W., Dai J. Recent developments of chalcones as potential antibacterial agents in medicinal chemistry. *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2020. Vol. 187. P. 111980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2019.111980>
4. Elkhailifa D., Al-Hashimi I., Al Moustafa A.-E., Khalil A. A comprehensive review on the antiviral activities of chalcones. *Journal of Drug Targeting*. 2021. Vol. 29, No. 4. P. 403–419.
5. Santos M. B., Pinhanelli V. C., Garcia M. A. R., et al. Antiproliferative and pro-apoptotic activities of 2'- and 4'-aminochalcones against tumor canine cells. *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2017. Vol. 138. P. 884–889. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2017.06.049>
6. Yang J., Lv J., Cheng S., et al. Recent Progresses in Chalcone Derivatives as Potential Anticancer Agents. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*. 2023. Vol. 23. Issue 11. P. 1265–1283. DOI: <https://doi.org/10.2174/1871520623666230223112530>
7. Acharjee S., Maity T. K., Samanta S., et al. Antihyperglycemic activity of chalcone based novel 1-{3-[3-(substituted phenyl) prop-2-enoyl] phenyl} thioureas. *Synthetic Communications*. 2018. Vol. 48, No. 23. P. 3015–3024. DOI: <https://doi.org/10.1080/00397911.2018.1539178>
8. Królicka E., Kieć-Kononowicz K., Łażewska D. Chalcones as potential ligands for the treatment of Parkinson's disease. *Pharmaceuticals*. 2022. Vol. 15, No. 7. P. 847. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph15070847>
9. Song D.-m., Jung K.-h., Moon J.-h., Shin D.-m. Photochemistry of chalcone and the application of chalcone-derivatives in photo-alignment layer of liquid crystal display. *Optical Materials*. 2003. Vol. 21, No. 1–3. P. 667–671
10. Mellado M., Sarriego-Kluge R., Valdés-Navarro F., et al. Synthesis of fluorescent chalcones, photophysical properties, quantitative structure-activity relationship and their biological application. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2023. Vol. 291. P. 122332.
11. Ibrahim-Ouali M., Dumur F. Recent advances on chalcone-based photoinitiators of polymerization. *European Polymer Journal*. 2021. Vol. 158. P. 110688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110688>
12. Nayak Y. N., Gaonkar S. L., Sabu M. Chalcones: versatile intermediates in heterocyclic synthesis. *Journal of Heterocyclic Chemistry*. 2023. Vol. 60, No. 8. P. 1301–1325. DOI: <https://doi.org/10.1002/jhet.4617>
13. Albuquerque H. M. T., Santos M. M. C., Cavaleiro J. A. S., Silva A. M. S. Chalcones as Versatile Synthons for the Synthesis of 5- and 6-membered Nitrogen Heterocycles. *Current Organic Chemistry*. 2014. Vol. 18, No 21. P. 2750–2775.
14. Gaonkar L. S., Vignesh U. N. Synthesis and pharmacological properties of chalcones: a review. *Research on Chemical Intermediates*. 2017. Vol. 43. P. 6043–6077.
15. Hermange P., Gøgsig T. M., Lindhardt A. T., et al. Carbonylative Heck reactions using CO generated *ex situ* in a two-chamber system. *Organic Letters*. 2011. Vol. 13, No. 9. P. 2444–2447.
16. Bestmann H. J., Arnason B. Reaktionen mit Phosphin-alkylenen, II. C-Acylierung von Phosphin-alkylenen. Ein neuer Weg zur Synthese von Ketonen. *Chemische Berichte*. 1962. Vol. 95. I.6. P. 1513–1527. <https://doi.org/10.1002/cber.19620950631>
17. Farooq S., Ngaini Z. Recent Synthetic Methodologies for Chalcone Synthesis (2013–2018). *Current Organocatalysis*. 2019. Vol. 6. P. 184–192. <https://doi.org/10.2174/2213337206666190306155140>
18. Donaire-Arias A., Poulsen M. L., Ramón-Costa J., Montagut A. M., Estrada-Tejedor R. and Borrell J. I. Synthesis of Chalcones: An Improved High-Yield and Substituent-Independent Protocol for an Old Structure. *Molecules*. 2023. Vol. 28(22). P. 7576. <https://doi.org/10.3390/molecules28227576>
19. Xu C., Chen G., Huang, X. Chalcones by the Wittig reaction of a stable ylide with aldehydes under microwave irradiation. *Organic Preparations and Procedures International*. Vol. 27. I.5. P. 559–561. <https://doi.org/10.1080/00304949509458500>

20. Листван В. В. Синтез нових похідних бензоксазину за реакцією Віттіга. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 6. С. 44–53. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.6.2023.5>

REFERENCES:

1. Zhuang, C., Zhang, W., Sheng, C., et al. (2017). Chalcone: a privileged structure in medicinal chemistry. *Chemical Reviews*, 117(12), Pp. 7762–7810. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00020>
2. Mahapatra, D. K., Bharti, S. K., Asati, V. (2017). Chalcone derivatives: anti-inflammatory potential and molecular targets perspectives. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 17(28), Pp. 3146–3169. DOI: <https://doi.org/10.2174/1568026617666170914160446>
3. Dan, W., Dai, J. (2020). Recent developments of chalcones as potential antibacterial agents in medicinal chemistry. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 187, 111980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2019.111980>
4. Elkhalfa, D., Al-Hashimi, I., Al Moustafa, A.-E., Khalil, A. (2021). A comprehensive review on the antiviral activities of chalcones. *Journal of Drug Targeting*, 29(4), Pp. 403–419.
5. Santos, M. B., Pinhanelli, V. C., Garcia, M. A. R., et al. (2017). Antiproliferative and pro-apoptotic activities of 2'- and 4'-aminochalcones against tumor canine cells. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 138, Pp. 884–889. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2017.06.049>
6. Yang, J., Lv, J., Cheng, S., et al. (2023). Recent progresses in chalcone derivatives as potential anticancer agents. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*, 23(11), Pp. 1265–1283. DOI: <https://doi.org/10.2174/1871520623666230223112530>
7. Acharjee, S., Maity, T. K., Samanta, S., et al. (2018). Antihyperglycemic activity of chalcone based novel 1-{3-[3-(substituted phenyl) prop-2-enoyl] phenyl} thioureas. *Synthetic Communications*, 48(23), Pp. 3015–3024. DOI: <https://doi.org/10.1080/00397911.2018.1539178>
8. Królicka, E., Kieć-Kononowicz, K., Łazewska, D. (2022). Chalcones as potential ligands for the treatment of Parkinson's disease. *Pharmaceuticals*, 15(7), P. 847. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph15070847>
9. Song, D.-M., Jung, K.-H., Moon, J.-H., Shin, D.-M. (2003). Photochemistry of chalcone and the application of chalcone-derivatives in photo-alignment layer of liquid crystal display. *Optical Materials*, 21(1–3), Pp. 667–671.
10. Mellado, M., Sarriego-Kluge, R., Valdés-Navarro, F., et al. (2023). Synthesis of fluorescent chalcones, photophysical properties, quantitative structure-activity relationship and their biological application. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 291, 122332.
11. Ibrahim-Ouali, M., Dumur, F. (2021). Recent advances on chalcone-based photoinitiators of polymerization. *European Polymer Journal*, 158, 110688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110688>
12. Nayak, Y. N., Gaonkar, S. L., Sabu, M. (2023). Chalcones: versatile intermediates in heterocyclic synthesis. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, 60(8), Pp. 1301–1325. DOI: <https://doi.org/10.1002/jhet.4617>
13. Albuquerque, H. M. T., Santos, M. M. C., Cavaleiro, J. A. S., Silva, A. M. S. (2014). Chalcones as versatile synthons for the synthesis of 5- and 6-membered nitrogen heterocycles. *Current Organic Chemistry*, 18(21), Pp. 2750–2775.
14. Gaonkar, L. S., Vignesh, U. N. (2017). Synthesis and pharmacological properties of chalcones: a review. *Research on Chemical Intermediates*, 43, Pp. 6043–6077.
15. Hermange, P., Gøgsig, T. M., Lindhardt, A. T., et al. (2011). Carbonylative Heck reactions using CO generated ex situ in a two-chamber system. *Organic Letters*, 13(9), Pp. 2444–2447.
16. Bestmann, H. J., Arnason, B. (1962). Reaktionen mit Phosphin-alkylenen, II. C-Acylierung von Phosphin-alkylenen. Ein neuer Weg zur Synthese von Ketonen [Reactions with Phosphine Alkylens, II. C-Acylation of Phosphine Alkylens. A New Route to the Synthesis of Ketones]. *Chemische Berichte*, 95(6), Pp. 1513–1527. DOI: <https://doi.org/10.1002/cber.19620950631> [In German]
17. Farooq, S., Ngaini, Z. (2019). Recent synthetic methodologies for chalcone synthesis (2013–2018). *Current Organocatalysis*, 6, Pp. 184–192. DOI: <https://doi.org/10.2174/2213337206666190306155140>
18. Donaire-Arias, A., Poulsen, M. L., Ramón-Costa, J., et al. (2023). Synthesis of chalcones: an improved high-yield and substituent-independent protocol for an old structure. *Molecules*, 28(22), 7576. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28227576>
19. Xu, C., Chen, G., Huang, X. (1995). Chalcones by the Wittig reaction of a stable ylide with aldehydes under microwave irradiation. *Organic Preparations and Procedures International*, 27(5), Pp. 559–561. DOI: <https://doi.org/10.1080/00304949509458500>
20. Lystvan, V. (2023). Syntez novykh pokhidnykh benzoksazynonu za reaktsiyeyu Wittiga [Synthesis of new benzoxazine derivatives by the Wittig reaction]. *Ukrainskyy zhurnal pryrodnych nauk. – Ukrainian Journal of Natural Sciences*, (6), Pp. 44–53. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.6.2023.5> [In Ukrainian].

УДК 615.31:547.853:615.254.1

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-3>**Галина РІЗАК***кандидат фармацевтичних наук, радник директора Фонду на громадських засадах, Благодійний Фонд підтримки освіти, науки, науково-технічної діяльності, м. Ужгород, Україна***ORCID:** 0000-0002-0230-2366

Бібліографічний опис статті: Різак, Г. (2025). Дослідження зв'язку між функціональними групами 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R-тієно[2,3-d]піримідинів та їх біологічною активністю. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 17–25, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-3>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ГРУПАМИ 2,4-ДІОКСО- ТА 4-ІМІНО-2-ОКСО-3-ФЕНІЛ-5-R-6-R-ТІЄНО[2,3-d]ПІРИМІДИНІВ ТА ЇХ БІОЛОГІЧНОЮ АКТИВНІСТЮ

Популярність застосування діуретичних засобів у сучасній медицині та їх недоліки зумовлюють пошук нових сполук, що проявляють цю активність. Не зважаючи на появу у системі охорони здоров'я нових препаратів діуретичної спрямованості дії, суттєві проблеми, що пов'язані, в першу чергу, з електролітичними порушеннями, лишаються невирішеними. Доведено діуретичну дію 2-алк(ацил)окси-4-оксо-3-феніл-5-R-6-R'-тієно[2,3-d]-піримідинів (зокрема, 2-етокси-4-оксо-3-феніл-5,6-триметиленотієно[2,3-d]піримідину та n-2-ацетокси-4-оксо-3-феніл-5,6-диметилтієно[2,3-d]піримідину) та визначено, в цей же час власне для похідних 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R-тієно[2,3-d]піримідинів не встановлено зв'язок «хімічна будова – біологічна дія». Мета роботи – встановлення зв'язку між функціональними групами 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R-тієно[2,3-d]піримідинів та їх біологічною активністю. Методологія. Визначення діуретичної та протизапальної активності проводили *in vivo*, вивчаючи, відповідно, вплив сполук на секреторну функцію нирок (референс-препарат гіпотіазид) та на зменшення набряку на моделі карегенінового набряку (референс-препарат вольтврєн). Протимікробну дію вивчали *in vitro* на музейних штамах мікроорганізмів. Наукова новизна. Вперше досліджено зв'язок між функціональними групами молекул 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R-тієно[2,3-d]піримідинів та їх біологічною, зокрема діуретичною, активністю. Висновки. Встановлено закономірність «функціональна група – біологічна дія» для похідних 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R-тієно[2,3-d]піримідинів відносно діуретичної, протизапальної та антимікробної дії. Доведено підвищення діуретичної активності оксо- та імінопохідних за наявності у молекулі тетраметиленового угруповання. В цей час наявність диметиленового радикалу у молекулі оксопохідних незначно корелює з антимікробною дією сполук. Перспективу подальшого вивчення цього ряду сполук як потенційних АФІ-діуретиків можливо пов'язати з дослідженнями сполуки V – 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5,6-триметиленотієно-[2,3-d]піримідину.

Ключові слова: 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R-тієно[2,3-d]піримідини, функціональні групи, зв'язок з біологічною активністю.

Galina RIZAK*Candidate of Pharmaceutical Sciences, Adviser to the Director of the Foundation on Public Grounds, Charitable Fund for the Support of Education, Science, Scientific and Technical Activities, Uzhgorod, Ukraine***ORCID:** 0000-0002-0230-2366

To cite this article: Rizak, G. (2025). Doslidzhennia vviazku mizh funktsionalnymy hrupamy 2,4-diokso- ta 4-imino-2-okso-3-fenil-5-R-6-R-tiieno[2,3-d]pirymidyniv ta yikh biolohichnoi aktyvnistiu [Investigation of the relationship between the functional groups of 2,4-dioxo- and 4-imino-2-oxo-3-phenyl-5-R-6-R-thieno[2,3-d]pyrimidines and their biological activity]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 17–25, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-3>

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE FUNCTIONAL GROUPS OF 2,4-DIOXO- AND 4-IMINO-2-OXO-3-PHENYL-5-R-6-R-THIENO[2,3-d]PYRIMIDINES AND THEIR BIOLOGICAL ACTIVITY

The popularity of diuretic agents in modern medicine and their disadvantages lead to the search for new compounds with this activity. Despite the emergence of new diuretic drugs in the healthcare system, significant problems associated primarily with electrolyte disorders remain unresolved. The diuretic effect of 2-alk(acyl)oxy-4-oxo-3-phenyl-5-R-6-R'-thieno[2,3-d]-pyrimidines (in particular, 2-ethoxy-4-oxo-3-phenyl-5,6-trimethylenothieno[2,3-d]pyrimidine and p-2-acetoxy-4-oxo-3-phenyl-5,6-dimethylthieno[2,3-d]pyrimidine) and determined, at the same time, the chemical structure-biological action relationship has not been established for the derivatives of 2,4-dioxo- and 4-imino-2-oxo-3-phenyl-5-R-6-R-thieno[2,3-d]pyrimidines. The aim of this work is to establish the relationship between the functional groups of 2,4-dioxo- and 4-imino-2-oxo-3-phenyl-5-R-6-R-thieno[2,3-d]pyrimidines and their biological activity. Methodology. The diuretic and anti-inflammatory activity was determined in vivo by studying, respectively, the effect of compounds on renal secretory function (reference drug hypothiazide) and on edema reduction in the model of karegenin edema (reference drug voltren). The antimicrobial effect was studied in vitro on museum strains of microorganisms. Scientific novelty. The relationship between the functional groups of 2,4-dioxo- and 4-imino-2-oxo-3-phenyl-5-R-6-R-thieno[2,3-d]pyrimidines and their biological, in particular diuretic, activity was investigated for the first time. The regularity of 'functional group – biological action' for 2,4-dioxo- and 4-imino-2-oxo-3-phenyl-5-R-6-R-thieno[2,3-d]pyrimidine derivatives in terms of diuretic, anti-inflammatory and antimicrobial activity was established. An increase in the diuretic activity of oxo- and imino-derivatives in the presence of a tetramethylene group in the molecule was proved. At the same time, the presence of a dimethylene radical in the oxo-derivatives molecule slightly correlates with the antimicrobial effect of the compounds. The prospect of further study of this series of compounds as potential API diuretics may be related to the studies of compound V – 4-imino-2-oxo-3-phenyl-5,6-trimethylenothieno[2,3-d]pyrimidine.

Key words: 2,4-dioxo- and 4-imino-2-oxo-3-phenyl-5-R-6-R-thieno[2,3-d]pyrimidines, functional groups, relationship with biological activity.

Постановка проблеми. Пошук нових засобів діуретичної дії є актуальною задачею сучасної охорони здоров'я. Діуретики сьогодні – це часто застосована група лікарських засобів. Хімічний склад препарату зумовлює різні механізми дії, а також різну її швидкість та тривалість. Відомо п'ять груп діуретиків: тіазидні, петльові, калійзберігальні, осмотичні та комбіновані.

Останні дослідження в цьому напрямку свідчать про те, що розробка нових діуретиків з більш досконалішими характеристиками (зменшення частоти сечовипускань, покращення фізичного стану, зниження частоти потрапляння на лікарняну койку та зменшення тривалості стаціонарного лікування, тощо), наприклад торасеміду (Білецький із співавт., 2024, с. 139) не вирішують усіх проблем у хворих на хронічну серцеву недостатність, тобто суттєво не сприяють покращенню якості життя (Білецький, Сидорчук, Петринич, Казанцева, Білецький, Бойко, 2024). Переважно назначають фуросемід (до 87 % випадків, 0,4 % – торасемід та у 10 % хворих застосовують комбінації діуретиків (Можина, 2023, с. 139). В той же час (Faris et al., 2002, с. 151) порівняння дії петльових діуретиків з іншими препаратами (інгібіторами АПФ, ібопаміном, дигоксином) показало покращення фізичних потєєнцій хворих на хронічну серцеву недостатність.

Доказова медицина рекомендує постійне використання діуретиків людям з різними захворюваннями, найчастіше з артеріальною гіпертензією та серцевою недостатністю (Білецький із співавт., 2024, с. 139; Можина, 2023, с. 139; Faris et al., 2002, с. 151; Супрун, 2017, с. 68).

Для діуретиків важливе ретельне контролювання терапії. Тому що це може мати серйозні наслідки – це в першу чергу, електролітні порушення (гіпокаліємія, гіпонатріємія, гіпокальціємія, гіпомагніємія). Це може зумовлювати серйозні серцеві аритмії.

Також вкрай важливе правильне дозування, тому що найважливіші наслідки їх застосування – це досягнення та утримування еуволемічного стану при використанні найнижчих доз діуретиків (Лазарєв, 2023, с. 6). Сьогодні широко застосовуються такі діуретики як гіпотіазид та фуросемід. Їх недоліками, окрім згаданих вище, є ризик розвитку гіпохлоремічного алкалозу, гіперурикемії, загострення латентного цукрового діабету, подагри, лейкопенії, тощо.

Оптимізації діуретичної терапії приділяється недостатньо уваги, найчастіше характеризують лише один препарат. Крім того, відомі випадки виникнення резистентності пацієнту до діуретиків, що є значною клінічною проблемою.

Ці особливості зумовлюють актуальність питання пошуку препаратів діуретичної дії, особливо в рядах нових синтезованих сполук (Escudero et al., 2022; Українець з співавт., 2027, с. 170; Drapak et al., 2021, с. 35; Ergena et al., 2022). При цьому скрінінг, що базується на визначенні біологічної дії є одним з традиційних підходів до пошуку нових перспективних органічних сполук (Маркіна, 2017, с. 70), зокрема й з установленням закономірності «хімічна будова-дія» (Голік з співавт., 2018, с. 36). Відомо про одержання 2-алк(ацил)окси-4-оксо-3-феніл-5-R-6-R'-тієно[2,3-d]-піримідинів (зокрема, 2-етокси-4-оксо-3-феніл-5,6-триметиленотієно[2,3-d]піримідину та *n*-2-ацетокси-4-оксо-3-феніл-5,6-

диметилтієно[2,3-d]піримідину), що проявляють діуретичну активність, що переважає активність гіпотіазиду при тому, що гостра токсичність нижча, та встановлено певні закономірності їх біологічної активності в залежності від будови, зокрема, наявності алкокси та ацильних замісників в молекулі призводить до підвищення діуретичного ефекту. До речі, сполуки, що проявляють діуретичну дію, також проявляють й протизапальну (Різак^а, 2024, с. 32; Різак, 2016, с. 225; Різак^б, 2024, с. 78).

Але власне для похідних 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R'-тієно[2,3-d]піримідинів (формули – див. рис. 1) таку закономірність не встановлено. Тому зважаючи на можливість застосування сполук як АФІ

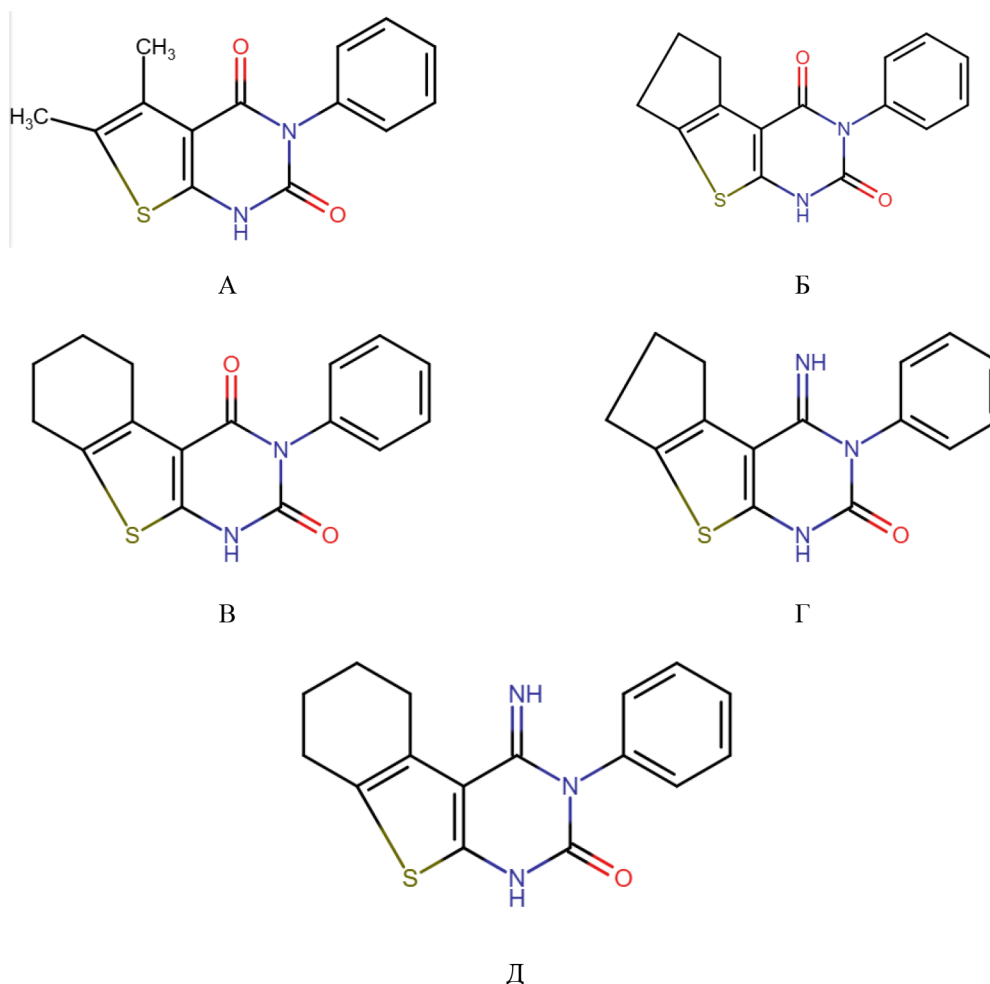


Рис. 1 Формули сполук, що досліджували:

похідні 2,4-діоксо-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R'-тієно[2,3-d]піримідину:

А – сполука I (2,4-діоксо-3-феніл-5,6-диметиленотієно[2,3-d]піримідин);

Б – сполука II (2,4-діоксо-3-феніл-5,6-триметиленотієно[2,3-d]піримідин);

В – сполука III (2,4-діоксо-3-феніл-5,6-тетраметиленотієно[2,3-d]піримідин);

похідні 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R'-тієно[2,3-d]піримідинів:

Г – сполука IV (4-іміно-2-оксо-3-феніл-5,6-триметиленотієно[2,3-d]піримідин);

Д – сполука V (4-іміно-2-оксо-3-феніл-5,6-тетраметиленотієно[2,3-d]піримідин)

(зважаючи на достатньо простий шлях синтезу) з діуретичним ефектом, перспективно встановити зв'язок між хімічною будовою та біологічною дією даних речовин.

Мета статті – аналіз зв'язку між функціональними групами 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R-тієно[2,3-d]піримідинів та їх біологічною активністю.

Завдання статті:

1. Визначити рівень токсичності шляхом визначення LD₅₀.
2. Визначити діуретичну активність та співставити її з будовою синтезованих сполук.
3. Встановити протизапальну дію та, за умов позитивних результатів, зв'язати цю дію з замісниками у молекулах.
4. Визначити спектр антимікробної активності та МБК та співставити ці показники з будовою сполук.

Матеріали та методи

Об'єктами дослідження стали похідні тієно[2,3-d]піримідинів: сполука I (2,4-діоксо-3-феніл-5,6-диметиленотієно[2,3-d]піримідин), сполука II (2,4-діоксо-3-феніл-5,6-триметиленотієно[2,3-d]піримідин), сполука III (2,4-діоксо-3-феніл-5,6-тетраметиленотієно[2,3-d]піримідин), сполука IV (4-іміно-2-оксо-3-феніл-5,6-триметиленотієно[2,3-d]піримідин), сполука V (4-іміно-2-оксо-3-феніл-5,6-тетраметиленотієно[2,3-d]піримідин).

Методика визначення гострої токсичності. Гостру токсичність досліджуваних сполук проводили експрес-методом визначення середньосмертельних доз (LD₅₀) хімічних речовин (Доклінічні дослідження лікарських засобів, 2001).

Методика визначення діуретичної активності. Для встановлення сечогінної (діуретичної) активності досліджуваних сполук було обрано безпородні білі щури-самці вагою 200–250 г. В кожній серії дослідів щодо впливу сполук на секреторну функцію нирок використано групу по 5 тварин. Сполуки суспендували у воді та стабілізували твіном-80. Таким стабілізований суспендований розчин вводили щурам внутрішньошлунково за допомогою спеціального зонду. Дози сполук, що вивчали, відповідали ЕД₅₀ референс-препарату (гіпотіазиду – 40 мг/кг). Протягом 2–3 год 25 тваринам до водного навантаження не давали води та корму. Паралельно контрольні досліди здійснювали на тваринах в аналогічних умовах. Після

цього тваринам у шлунок із розрахунку 3 мл води/100 г маси білих щурів подавали водне навантаження. Тварини вміщували до індивідуальних обмінних кліток, які пристосовано для збирання сечі. Об'єм сечі, що утворювався, вимірювали щогодинно, протягом 4 год. Об'єм сечі, що виділяли тварини контрольної групи, вважали за 100 % (Сидоров, 1973).

Розрахунки діуретичної активності здійснювали за формулою:

$$ДА = \frac{V_d}{V_k} 100,$$

де ДА – діуретична активність, в %; V_d – об'єм сечі, виділеної тваринами дослідної групи, мл; V_k – об'єм сечі, виділеної тваринами контрольної групи, мл.

Діуретична активність, що виражали у відсотках і визначала здатність сполук, що досліджували, стимулювати видільну функцію нирок.

Методика визначення протизапальної (антисексудативної) дії (Хаджай, 1968). було обрано модель карагенінового набряку стопи мишей. Для дослідів використовували білі миші вагою 18–22 г. Як флогенний агент застосовували 1 % розчин карагеніну, що викликав гостре асептичне запалення. 0,05 мл цього розчину вводили субплантарно. Попередньо (за годину) мишам вводили перорально суспензію досліджуваної сполуки. Через 3 год тварин виводили з дослідів та на рівні тазостегнових суглобів ампутували набряклі та ненабряклі задні стопи. Сполуки, що вивчали, вводили у вигляді суспензії при стабілізації отриманої зависі твіном-80. Контрольна група тварин одержувала еквівалентну кількість розчинника. Препаратом порівняння було обрано диклофенак натрію (вольтарен) у дозі 3,8 мг/кг (доза розрахована у перерахунку з терапевтичної дози для людини за допомогою коефіцієнта перерахунку доз за Ю. В. Риболєвим). Активність досліджуваних речовин визначали за їх здатністю зменшувати розвиток набряку в порівнянні з контролем і виражали у відсотках, які показують, наскільки ця речовина пригнічує розвиток карагенінового набряку у порівнянні з контролем, де величина набряку приймається за 100 %. Про розвиток набряку судили за збільшенням об'єму стопи, який вимірювали в динаміці через 1, 2, 3, 4 і 5 год механічним онкометром за методом А. С. Захаржевського (Лакін, 1990). Величину

набряку обчислювали як різницю об'ємів інтактної та запаленої кінцівок. Антиексудативну активність синтезованих сполук визначали за ступенем зменшення набряку у піддослідних тварин порівняно з контрольними та виражали у відсотках і визначали здатність зменшувати набряки у піддослідних тварин, порівняно з контрольними тваринами.

Протизапальну (антиексудативну) дію вважали як відсоток пригнічення набряку та здійснювали розрахунок за формулою 2.2:

$$ПА = \frac{V_d - V_k}{V_k} 100,$$

де ПА – протизапальна (антиексудативна) активність у %; V_d – різниця між запаленою та незапаленою кінцівками в досліді, $см^3$; V_k – різниця між запаленою та незапаленою кінцівками в контролі, $см^3$.

Антимікробну активність синтезованих, 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R'-тієно[2,3-d]піримідинів, проводили в лабораторії протимікробних засобів ДУ «Інститут мікробіології та імунології ім. І. І. Мечникова АМН України» (зав. лабораторії к. мед. н. Казмірчук В. В.) Протимікробну активність вивчали *in vitro* із застосуванням стандартного набору еталонних тест-штамів як грампозитивних та грамнегативних бактерій (*S. aureus* ATCC 29213, 40 *E. coli* ATCC 25922, *P. aeruginosa* ATCC 27853, *B. subtilis* ATCC 6633), що належать до основних клінічно значущих груп збудників інфекційних та гнійно-запальних захворювань. Протигрибкову дію вивчали на тест-культури дріжджоподібного гриба роду *Candida* – музейному тест-штамі *C. albicans* ATCC 885-653. Усі тест-штами одержано з Музею мікроорганізмів ДУ «ІМІ ім. І. І. Мечникова АМН України». Посіви з мікроорганізмами, що вивчалися, витримували в термостаті при температурі 37 °C протягом 18–24 год. Результати враховували за відсутністю росту в останній пробірці, що відповідає мінімальній інгібувальній концентрації (МІК). Для визначення мінімальної бактерицидної концентрації (МБК) з двох-трьох останніх пробірок ряду здійснювали висів 0,1 мл в чашки Петрі з твердим поживним середовищем (м'ясо-пептонний агар, кров'яний агар тощо). Після 18–24 год інкубування при температурі 37 °C відмічали мінімальну концентрацію, яка не давала росту

на агарі і відповідала значенню МБК. При проведенні досліджень використовували ододобові культури мікроорганізмів. Усі досліди супроводжували відповідними додатковими контролюми якості середовища та чистоти мікробної культури. Мікробне навантаження до музейних штамів становило 5×10 КУО/мл. Як розчинники в дослідженнях використано ДМСО; вихідні розчини досліджуваних речовин доводили до концентрації 1 мг/мл. Мікроскопічне дослідження проводили під мікроскопом «Біолан» при збільшенні $\times 100$, $\times 200$, $\times 400$.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Перш ніж вивчати біологічну активність синтезованих сполук, проведено визначення гострої токсичності для з'ясування перспектив подальших досліджень цих речовин в якості АФІ. Дослідним шляхом доведено, що LD_{50} сполук I–V, як при внутрішньошлунковому, так і при внутрішньоочеревинному введенні перевищує 5000 мг/кг. За класифікацією Сидорова (1973) досліджувані сполуки можуть бути віднесені до практично нетоксичних. Відповідно, гостра токсичність референс-препаратів дорівнювала: для визначення діуретичної активності – гіпотіазиду $LD_{50} = 1175$ мг/кг.

Аналіз результатів вивчення діуретичної активності сполук I–V (рис. 2) показав, що сполуки I, III, IV та V в умовах водного навантаження викликають збільшення видільної функції нирок. Середня діуретична активність сполуки I становила 11,25 %, при заміні диметиленового замісника у 5,6-положенні молекули на тетраметиленовий – діуретична активність зростає в 1,5 рази та становить для сполуки III 17,09 %.

Триметиленове угруповання, що має місце у будові молекули сполуки II у поєднанні з 2,4-діоксистеруктурою призвело до ефекту, що протилежний діуретичному.

Порівняно з оксопохідними (сполуки I та III) іміноаналоги (сполуки IV та V) проявили у 1,9–2,3 рази вищий рівень активності.

При переході до 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R'-тієно[2,3-d]піримідинів спостерігалось підвищення рівня діуретичної активності на рівні 20,85 %–25,93 %.

Таким чином, спостерігається збільшення діуретичної дії як для оксо-, так й для імінопохідних при заміні радикалу у положенні 5 та 6 молекули на тетраметиленовий. Тому, з точки зору цього показника

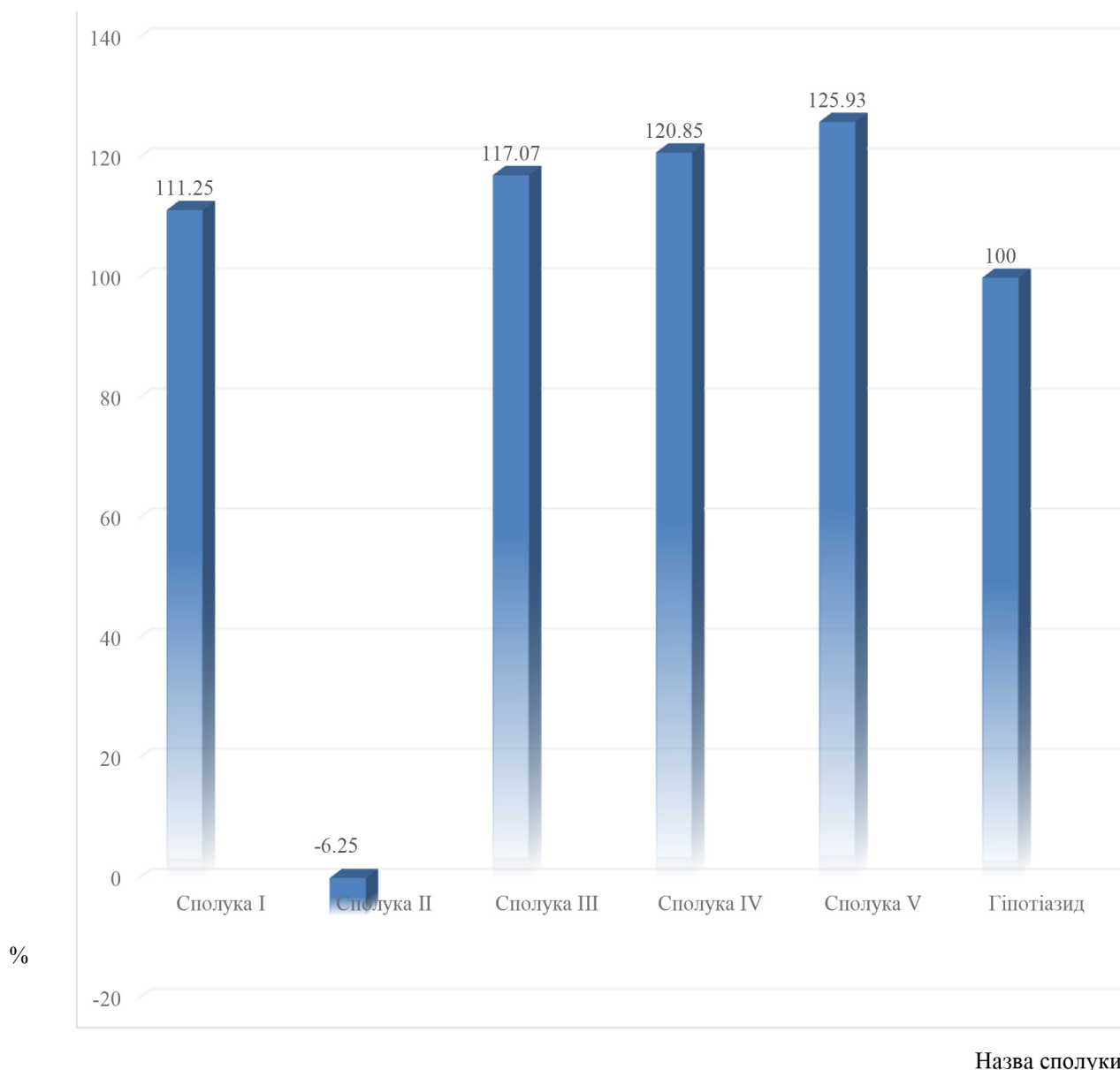


Рис. 2. Діуретична активність досліджуваних похідних 2,4-діоксо-3-феніл-5-г-6-г-тієно[2,3-d] піримідинів (сполуки I–III) та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-г-6-г-тієно[2,3-d] піримідинів (сполуки IV та V) порівнянно з гіпотіазидом

* Середня діуретична активність, %

сполука V (4-іміно-2-оксо-3-феніл-5,6-тетраметилєно[2,3-d]піримідин) найперспективніша для подальших досліджень.

Визначення протизапальної дії сполук I та IV показало незначний (в порівнянні з вольтареном) антиексудативний ефект, що був незначно вищий для сполуки I (22,52 % антиексудативної активності при $0,552 \pm 0,03$ г зменшення набряку) порівнянно зі сполукою IV (18,06 % антиексудативної активності при $0,592 \pm 0,03$ г зменшення набряку).

Проведені дослідження антимікробної дії дозволили встановити, що інгібувальна

концентрація сполук I та II відносно штамів грамнегативних та грампозитивних мікроорганізмів *S. aureus* ATCC 29213, *E. coli* ATCC 25922, *P. aeruginosa* ATCC 27853, *B. subtilis* ATCC 6633, а також штаму дріжджеподібного грибка *C. albicans* ATCC 885-653 коливалась у межах 50–100 мкг/мл, а бактерицидна – 50–200 мкг/мл.

Результати встановлення протимікробної активності досліджуваних оксопохідних (сполуки I та II) свідчать про те, що обидві сполуки виявили помірну інгібувальну дію відносно штаму *S. aureus* ATCC 29213 у концентрації

50 мкг/мл. Відносно штамів *E. coli* ATCC 25922 та *B. subtilis* ATCC 6633 тільки сполука I проявила помірну інгібувальну дію у тій же концентрації. У ході проведеного дослідження виявлено, що відносно *C. albicans* ATCC 885-653 значна кількість досліджених сполук I проявила фунгістатичну дію у концентрації 50 мкг/мл. Таким чином, можна припустити, що наявність диметиленового угруповання у 5,6-положеннях молекули сприяє розширенню спектру антимікробної дії на відміну від впливу триметиленового радикалу.

Слабкими місцями дослідження є недостатня системність проведених дослідів.

Можливими обмеженнями можуть стати можливі зміни виходу кінцевого продукту при збільшенні обсягів реагентів для синтезу та очищення отриманої сполуки.

Перспективами подальших досліджень є більш поглиблене та більш різнобічне вивчення сполуки V – 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5,6-триметиленотієно[2,3-d]піримідину: вивчення антимікробної дії відносно клінічних штамів мікроорганізмів, визначення

протизапальної дії на інших моделях (зимозановий набряк, ревматоїдний артрит).

Висновки і перспективи подальших досліджень

1. Вперше з'ясована кореляція хімічна будова – біологічна активність для похідних 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R-тієно[2,3-d]піримідинів.

2. Встановлено закономірність «функціональна група біологічна дія» для похідних 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R-тієно[2,3-d]піримідинів відносно діуретичної, протизапальної та антимікробної дії. Доведено підвищення діуретичної активності оксо- та імінопохідних за наявності у молекулі тетраметиленового угруповання. В цей час наявність диметиленового радикалу у молекулі оксопохідних незначно корелює з антимікробною дією сполук.

3. Перспективу подальшого вивчення цього ряду сполук як потенційних АФІ-діуретиків можливо пов'язати з дослідженнями сполуки V – 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5,6-триметиленотієно[2,3-d]піримідину.

ЛІТЕРАТУРА:

- Білецький С. В., Сидорчук Л. П., Петринич О. А., Казанцева Т. В., Білецький С. С., Бойко В. В. Діуретики при лікуванні хронічної серцевої недостатності: фуросемід або торасемід (огляд літератури). *Буковинський медичний вісник*. 2024. Т. 110, № 2. С. 137–141. DOI: <https://doi.org/10.24061/2413-0737.28.2.110.2024.21>
- Можина Т. Л. Якому петльовому діуретику надати перевагу: огляд даних доказової медицини. *Український медичний часопис*. 2023. № 2. С. 67–70. DOI: 10.32471/umj.1680-3051.154.241239
- Faris R., Flather M., Purcell H., Henein M., Poole-Wilson P., Coats A. Current evidence supporting the role of diuretics in heart failure: a meta analysis of randomised controlled trials. *International Journal of Cardiology*. 2002. № 82. Р. 149–158.
- Лазарєв П. О. Петльові діуретики – правила призначення при застійній хронічній серцевій недостатності. *Ліки України*. 2023. № 1. С. 5–7.
- Можина Т. Л. Місце тіазидоподібного діуретика хлорталідону в лікуванні артеріальної гіпертензії: дані оновлених настанов ESC. *Український медичний часопис*. 2023. № 12. С. 9–13. DOI: 10.32471/umj.1680-3051.158.249695
- Супрун Є. А. Место диуретиков в лечении артериальной гипертензии. *Рациональная фармакотерапия*. 2017. Т. 44, № 3. С. 66–74.
- Escudero V. J., Mercadal J., Molina-Andújar A., Piñeiro G. J., Cucchiari D., Jacas A. New insights into diuretic use to treat congestion in the ICU: beyond furosemide. *Frontiers in Nephrology*. 2022. 2:879766. DOI: 10.3389/fneph.2022.879766
- Украинец И. В., Сидоренко Л. В., Голик Н. Ю., Черненко И. Н. Поиск новых диуретиков среди... *KyivPharma-2017*. Київ, 2017. С. 170.
- Drapak I. V., Zimenkovsky B. S., Slabyu M. V., Holota S. M., Perekhoda L. O., Yaremkevych R. V., Nektegayev I. O. Synthesis and diuretic activity of novel 5-amino-1,3,4-thiadiazole-2-thiol derivatives. *Biopolymers and Cell*. 2021. Vol. 37, N 1. P. 33–45. DOI: <http://dx.doi.org/10.7124/bc.000A4A>
- Ergena A., Rajeshwar Y., Solomon G. Synthesis and diuretic activity of substituted 1,3,4-thiadiazoles. *Scientifica (Cairo)*. 2022. Vol. 8. P. 3011531. DOI: 10.1155/2022/3011531
- Маркина А. Ю., Мищенко О. Я. Скрининговые исследования новых производных 2-оксоиндолина. *Фармакологія та лікарська токсикологія*. 2017. Т. 54, № 3. С. 69–73.
- Голік М. Ю., Українець І. В., Сидоренко Л. В., Сім Г. Закономірності зв'язку «будова – діуретична дія»... *Матеріали конференцій*, Харків, 2018. С. 36.

13. Пат. u 2012 01452 Україна... Заявл. 13.02.2012.
14. Різак Г. В. Біоорганічна хімія: навчально-методичний посібник. Ужгород : ФОП Сабов А. М., 2024. 667 с.
15. Різак Г. В. Методологія органічного синтезу: навчальний посібник. Ужгород : ФОП Сабов А. М., 2024. 490 с.
16. Різак Г. В. Синтез, фізико-хімічні та біологічні властивості.... Київ : Наукова думка, 2016. 112 с.
17. Доклінічні дослідження лікарських засобів (метод. рекомендації) / За ред. О. В. Стефанова. Київ : Авіцена, 2001. С. 292–297.
18. Сидоров К. К. О классификации токсичности ядов... *Токсикология новых промышленных химических веществ*. М. : Медицина, 1973. Вип. 13. С. 47–57.
19. Хаджай Я. М. О графическом способе определения эффективной дозы... *Фармакология и токсикология*. 1968. № 1. С. 118–123.
20. Лакин Г. Ф. Биометрия. М. : Высшая школа, 1990. 352 с.

REFERENCES:

1. Biletskyi, S. V., Sydorchuk, L. P., Petrynych, O. A., Kazantseva, T. V., Biletskyi, S. S., & Boiko, V. V. (2024). Diuretyky pry likuvanni khronichnoi sertsevoi nedostatnosti furosemid abo torasemid (ohliad literatury) [Diuretics in the treatment of chronic heart failure furosemide or torasemide (literature review)]. *Bukovynskyi medychnyi visnyk – Bukovinian Medical Herald*, 110(2), 137–141. <https://doi.org/10.24061/2413-0737.28.2.110.2024.21> [in Ukrainian].
2. Mozhina, T. L. (2023). Yakomu petl'ovomu diuretyku nadaty perevahu ohliad danykh dokazovoi medytsyny [Which loop diuretic to choose a review of evidence-based medicine data]. *Ukrainskyi medychnyi chasopys – Ukrainian Medical Journal*, (2), 67–70. <https://doi.org/10.32471/umj.1680-3051.154.241239> [in Ukrainian].
3. Faris, R., Flather, M., Purcell, H., Henein, M., Poole-Wilson, P., & Coats, A. (2002). Current evidence supporting the role of diuretics in heart failure a meta analysis of randomised controlled trials. *International Journal of Cardiology*, 82, 149–158.
4. Lazarev, P. O. (2023). Petl'ovi diuretyky – pravyla pryznachennia pry zastiniii khronichnii sertsevoi nedostatnosti [Loop diuretics – prescription rules for congestive chronic heart failure]. *Liky Ukrainy – Drugs of Ukraine*, (1), 5–7. [in Ukrainian].
5. Mozhina, T. L. (2023). Mistse tiazidopodibnoho diuretyka khlorotalidonu v likuvanni arteriiialnoi hipertenzii dany onovlenykh nastanov ESC [The role of the thiazide-like diuretic chlorthalidone in the treatment of arterial hypertension updated ESC guidelines]. *Ukrainskyi medychnyi chasopys – Ukrainian Medical Journal*, (12), 9–13. <https://doi.org/10.32471/umj.1680-3051.158.249695> [in Ukrainian].
6. Suprun, Ye. A. (2017). Mesto diuretykov v lechenii arterial'noi hipertenzii [The place of diuretics in the treatment of arterial hypertension]. *Ratsional'na farmakoterapiia – Rational Pharmacotherapy*, 44(3), 66–74.
7. Escudero, V. J., Mercadal, J., Molina-Andújar, A., Piñeiro, G. J., Cucchiari, D., & Jacas, A. (2022). New insights into diuretic use to treat congestion in the ICU beyond furosemide. *Frontiers in Nephrology*, 2, 879766. <https://doi.org/10.3389/fneph.2022.879766>
8. Ukrainets, I. V., Sydorenko, L. V., Holyk, N. Yu., & Chernenok, I. N. (2017). Poisk novykh diuretykov sredi... [Search for new diuretics among...]. *KyivPharma-2017*, Kyiv, 170. [in Russian].
9. Drapak, I. V., Zimenkovsky, B. S., Slabyi, M. V., Holota, S. M., Perekhoda, L. O., Yaremkevych, R. V., & Nekhtegayev, I. O. (2021). Synthesis and diuretic activity of novel 5-amino-1,3,4-thiadiazole-2-thiol derivatives. *Biopolymers and Cell*, 37(1), 33–45. <http://dx.doi.org/10.7124/bc.000A4A> [in English].
10. Ergena, A., Rajeshwar, Y., & Solomon, G. (2022). Synthesis and diuretic activity of substituted 1,3,4-thiadiazoles. *Scientifica (Cairo)*, 8, 3011531. <https://doi.org/10.1155/2022/3011531>
11. Markina, A. Yu., & Mishchenko, O. Ya. (2017). Skrynynhovie yssledovanyia novykh proyvodnykh 2-oksoindolyna [Screening studies of new derivatives of 2-oxoindoline]. *Farmakologhiia ta likars'ka toksykologhiia – Pharmacology and Drug Toxicology*, 54(3), 69–73. [in Russian].
12. Holik, M. Yu., Ukrainets, I. V., Sydorenko, L. V., & Sim, H. (2018). Zakonomirnosti zviazku budova – diuretychna diia [Structure–diuretic activity relationships]. *Materialy konferentsii – Conference Proceedings*, Kharkiv, 36. [in Ukrainian].
13. Pat. u 2012 01452 Ukraina... [Patent u 2012 01452 Ukraine...]. (2012, February 13). [in Ukrainian].
14. Rizak, H. V. (2024). Bioorhanichna khimiiia navchalno-metodychnyi posibnyk [Bioorganic chemistry educational-methodological manual]. Uzhhorod : FOP Sabov A. M. [in Ukrainian].
15. Rizak, H. V. (2024). Metodolohiia orhanichnoho synthezu navchal'nyi posibnyk [Methodology of organic synthesis educational manual]. Uzhhorod : FOP Sabov A. M. [in Ukrainian].
16. Rizak, H. V. (2016). Syntez, fizyko-khimichni ta biolohichni vlastyvoli [Synthesis, physicochemical and biological properties]. Kyiv : Naukova dumka. [in Ukrainian].

17. Doklinichni doslidzhennia likars'kykh zasobiv (metodychni rekomendatsii) / Za red. O. V. Stefanova. (2001). [Preclinical studies of medicinal products (methodical recommendations)]. Kyiv : Avicena, 292–297. [in Ukrainian].
18. Sydorov, K. K. (1973). O klassifikatsii toksichnosti yadov [On the classification of the toxicity of poisons]. *Toksikologiya novykh promyshlennykh khimicheskikh veshchestv – Toxicology of New Industrial Chemical Substances*, 13, 47–57.
19. Khadzhai, Ya. M. (1968). O hraficheskoy sposobe opredeleniya effektivnoy dozy [On the graphical method for determining the effective dose]. *Farmakologiya i toksikologiya – Pharmacology and Toxicology*, 1, 118–123.
20. Lakin, H. F. (1990). Biometriya [Biometry]. Moscow : Vysshaia shkola.

УДК 543.544:641/642-047.44

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-4>

Tetiana SAVCHUK

PhD, Associate Professor at the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0001-9416-0643

Svitlana KOROLCHUK

PhD, Associate Professor at the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-5830-3966

Larysa MARUSHKO

Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Chemistry and Ecology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-8373-6747

To cite this article: Savchuk, T., Korolchuk, S., Marushko, L. (2025). Vymogy do vody, pryznachenoï do vykorystannia pry vyhotovlenni napoyiv ta kontsentrativ. [Requirements for water intended for the technological production of beverages and concentrates]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 26–33, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-4>

REQUIREMENTS FOR WATER INTENDED FOR THE TECHNOLOGICAL PRODUCTION OF BEVERAGES AND CONCENTRATES

During the study, the main requirements for drinking water quality were examined, including sanitary-chemical, radiological, and epidemiological safety indicators. Various types of water and their qualitative characteristics were analyzed. It was proven that the quality of drinking water plays a key role in producing safe food products, particularly beverages and concentrates. Compliance with sanitary and hygienic standards ensures the minimization of health risks for consumers, while the use of effective purification methods allows for the removal of undesirable impurities that may affect the chemical composition and organoleptic properties of the final product. The application of methods such as mechanical, chemical, biological, and physical purification contributes to maintaining the optimal mineral composition of water, which is important not only for safety but also for enhancing the flavor characteristics of beverages. In addition, regular monitoring of water quality at all stages of its use in the production process helps prevent potential contamination and ensures the consistency of the final product's characteristics.

Thus, strict compliance with drinking water quality standards, the implementation of modern purification technologies, and the monitoring of all safety indicators are essential conditions for the production of high-quality beverages and concentrates that meet high safety requirements and consumer demand.

Key words: sanitary and chemical indicators of drinking water quality, radiation indicators of drinking water safety, organoleptic indicators, and epidemic safety indicators of drinking water, beverages, concentrates, and maximum permissible concentration (MPC).

Тетяна САВЧУК

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0001-9416-0643

Світлана КОРОЛЬЧУК

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-5830-3966

Лариса МАРУШКО

доктор педагогічних наук, доцент, декан факультету хімії та екології, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-8373-6747

Бібліографічний опис статті: Савчук, Т., Корольчук, С., Марушко, Л. (2025). Вимоги до води, призначеної до використання при виготовленні напоїв та концентратів. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 26–33, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-4>

ВИМОГИ ДО ВОДИ, ПРИЗНАЧЕНОЇ ДО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ НАПОЇВ ТА КОНЦЕНТРАТИВ

У ході дослідження були розглянуті основні вимоги до якості питної води, що включають санітарно-хімічні, радіаційні та епідемічні показники безпечності. Проаналізовано різновиди води, її якісні характеристики. Доведено, що якість питної води відіграє ключову роль у виробництві безпечних харчових продуктів, зокрема напоїв та концентратів. Відповідність санітарно-гігієнічним нормам гарантує мінімізацію ризиків для здоров'я споживачів, тоді як використання ефективних методів очищення дозволяє усунути небажані домішки, які можуть впливати на хімічний склад та органолептичні властивості кінцевої продукції. Застосування таких методів, як механічна, хімічна, біологічна та фізична очистка, сприяє збереженню оптимального мінерального складу води, що є важливим не лише для безпеки, а й для покращення смакових характеристик напоїв. Окрім цього, регулярний контроль якості води на всіх етапах її використання у виробничому процесі дозволяє запобігти можливим забрудненням та забезпечити стабільність характеристик кінцевого продукту.

Таким чином, суворе дотримання стандартів якості питної води, впровадження сучасних технологій очищення та моніторинг усіх показників безпечності є необхідними умовами для виробництва якісних напоїв та концентратів, що відповідають високим вимогам безпеки та споживчого попиту.

Ключові слова: санітарно – хімічні показники безпечності якості питної води, радіаційні показники безпечності питної води, органолептичні показники, показники епідемічної безпеки питної води, напої, концентрати, гранично допустима концентрація (ГДК).

Relevance. The relevance of the research is that water is one of the most important elements of the environment. It plays a key role in the physiological processes of the human body and has sanitary-hygienic, industrial, and epidemiological significance. The consumption of low-quality water can lead to violations of the sanitary regime at enterprises, the production of substandard goods, as well as cause infectious diseases, food poisoning, helminth infections, and more (Andrusyshyna, 2015).

Requirements for water used in the production of beverages and concentrates. The requirements for water used in the production of beverages and concentrates correspond to the requirements for drinking water intended for human consumption. Since beverages and concentrates are food products in which water is the main component, it is important to examine these requirements in detail.

Purpose of the article. The study of the requirements for water quality used in the production of beverages and concentrates. In particular, the article examines sanitary-chemical, radiation, and epidemic safety indicators, as well as methods of water purification and quality

control. Their impact on the final characteristics of the products is analyzed, including organoleptic properties, compliance with sanitary standards, and stability of composition.

Analysis of key terms and requirements. Water used in the production of beverages and concentrates must meet the requirements for drinking water intended for human consumption. Since beverages and concentrates are food industry products containing a significant amount of water, their quality directly affects the safety, organoleptic properties, and consumer characteristics of the final product. Drinking water intended for human consumption must meet the following hygienic requirements: it must be safe in terms of epidemiology and radiation, have favorable organoleptic properties, and contain a harmless chemical composition.

For the production of drinking water, preference should be given to water from underground sources of drinking water supply for the population, reliably protected from biological, chemical, and radiation contamination.

The hygienic assessment of the safety and quality of drinking water is conducted based on epidemic

safety indicators. These include microbiological, parasitological, sanitary-chemical, organoleptic, physicochemical, sanitary-toxicological, and radiation indicators.

When selecting a water source and water treatment technology during the construction or reconstruction of a public drinking water supply facility, preference should be given to sources and technologies that ensure the production of drinking water with an optimal content of mineral substances according to the indicators of the physiological adequacy of the mineral composition of drinking water (Vymohy do yakosti pytnoi vody, 2025; Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravy, 2022).

Considering the sanitary-chemical requirements for water quality, it can be stated that it must comply with the established hygienic standards regarding the content of chemical substances. (tabl. 1).

It is important to note that if the level of dry residue in drinking water after its artificial desalting is less than 100 mg/dm³, it is subject to demineralization. If disinfection is carried out during the production of drinking water, the manufacturer must take measures to minimize contamination of the drinking water with disinfection by-products.

When considering the microbiological parameters of water for the production of

beverages and concentrates, it must meet the following requirements: it should not contain (*Escherichia coli*) – absence in a 100 cm³ sample; total microbial count (TMC) at 37 °C – no more than 100 colony-forming units (CFU) per 1 cm³; pathogenic microorganisms (including *Salmonella*, *Vibrio cholerae*) – absence in a 1 dm³ sample; enterococci – absence in a 100 cm³ sample. As for organoleptic parameters (Table 2), the water must be colorless, transparent, free of sediment, with no foreign odor or taste (Malyna, Liasota, Hryshko, 2014; Malyna, Liasota, 2020).

The radiological component is also considered when analyzing water. The permissible levels of natural and artificial radionuclides in water must comply with sanitary standards. The content of harmful substances in drinking water that are not specified in the sanitary standards must not exceed their Maximum Allowed Concentrations (MACs), as defined by the sanitary standards for surface waters. In the presence of several substances in drinking water with the same limiting harmful property, belonging to hazard classes I and II, the sum of the ratios of the concentrations of each substance to its corresponding MAC must not exceed one (Table 3).

In the case of exceeding the specific total alpha activity in drinking water from underground water sources, it is necessary to determine the specific

Table 1

Sanitary and chemical water quality requirements

Indicator	pH	Total hardness, mmol/dm ³	Total mineralization, mg/dm ³	Chloride content, mg/dm ³	Sulfate content	Nitrate content, mg/dm ³	Iron content, mg/dm ³	Manganese content	Fluoride content, mg/dm ³	Permanganate oxidation, mg O ₂ /dm ³
MAC	6,5–8,5	7,0	1000	250	250	50	0,3	0,1	0,5–1,5	5

Table 2

Organoleptic water parameters

Parameter	Odor, score	Taste and aftertaste, score	Turbidity, mg/dm ³	Coloration, degrees
Requirements	no more than 2	no more than 2	no more than 1,5	no more than 20

Table 3

Radiation parameters of water

Parameter	MAC
Total activity of alpha emitters, Bq/dm ³	Not more than 0.1
Total activity of beta emitters, Bq/dm ³	Not more than 1,0

total activity of the natural mixture of uranium isotopes (U), the specific activities of radium (Ra-226, Ra-228), and radon (Rn-222). In the case of exceeding the specific total beta activity in drinking water from both surface and underground water sources, the specific activities of cesium (Cs-137) and strontium (Sr-90) should be determined.

In the case of contamination of drinking water with unknown toxic compounds and chemicals, for which no testing methods are available, it is recommended to use an auxiliary integral (express) indicator of drinking water quality – the drinking water toxicity index, calculated based on the results of biological tests (biotesting).

The drinking water toxicity index, which does not contain unidentified components, should not exceed 50 %, regardless of the test objects used.

The storage time of drinking water from distribution points, wells, and source captures in consumer containers should not exceed 24 hours, provided it is stored in a clean, sealed container at a temperature between 5 °C and 20 °C in places protected from direct sunlight.

The requirements for a centralized drinking water supply (tap water) for the population are as follows. When studying the microbiological indicators of tap drinking water, the total microbial count, total coliforms, *E. coli*, and enterococci are determined in its samples. In tap drinking water from surface water sources, at the points where it enters the distribution network from treatment facilities, the presence of coliphages should also be determined.

In case of detecting total coliforms, *E. coli*, or enterococci in samples of drinking water from underground water sources, or total coliforms, *E. coli*, enterococci, or coliphages in samples of drinking water from surface water sources, their determination should be carried out in re-sampled tests.

In the presence of deviations from the established standards in re-sampled tests, within 12 hours, research should be initiated to detect coliphages and bacterial pathogens of infectious diseases in drinking water from underground water sources, and to detect bacterial and viral pathogens of infectious diseases in drinking water from surface water sources. In case of detecting coliphages in samples of drinking water from underground water sources, investigations should be carried out to identify viral pathogens of infectious diseases (DSTU 7525:2014. Voda pytna, 2014).

Based on laboratory studies' results, measures are taken to identify and eliminate the causes of drinking water contamination.

During the disinfection of drinking water, residual concentrations of reagents are determined at least once per hour and should be as follows: – in the case of water disinfection using chlorine during a period of favorable sanitary and epidemiological conditions, the residual free chlorine content in the water at the outlet of the clean water reservoir (CWR) – should be within the range of 0.3–0.5 mg/dm³ after 30 minutes of contact with chlorine, while the residual combined chlorine content – should be within the range of 0.8–1.2 mg/dm³ after 60 minutes of contact with chlorine. Suppose both free and combined chlorine are present in the water. In that case, monitoring can be conducted for one of these indicators: residual free chlorine (when its concentration is above 0.3 mg/dm³) or residual combined chlorine (when the residual free chlorine concentration is less than 0.3 mg/dm³);

- During a deterioration of the sanitary and epidemiological situation, it is allowed to chlorinate water with increased doses of active chlorine (5–20 mg/dm³), provided that excess chlorine is removed from the water before it is supplied to the distribution network;

- In the case of water disinfection using ozone, the residual ozone concentration at the outlet of the mixing chamber should be within the range of 0.1–0.3 mg/dm³ after 4 minutes of ozone contact with the water;

- In the case of water disinfection using chlorine dioxide, the residual chlorine dioxide content in the clean water reservoir (CWR) after 30 minutes of contact should be no less than 0.1 mg/dm³, and the chlorite concentration should be no more than 0.2 mg/dm³ (Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoj dlja spozhyvannia liudynoiu, 2010; Prokopov, 2012; DSTU 4107-2002. Yakist vody, 2009).

Before using underground and potable water, institutions and establishments of the state sanitary and epidemiological service conduct preliminary laboratory studies of the source water. For underground water, the requirements of the Sanitary Norms must be taken into account.

Preliminary laboratory studies of the source water are carried out following the Sanitary Norms, based on a list of indicators considering local natural conditions.

Water samples are taken throughout the year at least once a month to determine microbiological, organoleptic, physicochemical, and sanitary-toxicological indicators. For drinking water from surface sources, parasitological indicators are also determined.

Water samples from new wells or those temporarily not in use are taken after the water has been pumped out until a stable dynamic level and clear water are achieved. The pumping rate should be equal to or greater than the design rate (Hryhorenko, 2019; Babienko, 2021).

The results of laboratory studies on the quality of source water and the sanitary-epidemiological survey of the area where the water intake is located, conducted by institutions and establishments of the state sanitary and epidemiological service, are taken into account during the state sanitary and epidemiological expertise of the technological regulations or other documents describing the technological process of bottled drinking water production and from filling points.

For the preservation of bottled drinking water and water from filling points, substances such as carbon dioxide, silver, etc., may be used.

Bottled drinking water and water from filling points must not contain flavorings, sweeteners, or other food or food flavoring substances, except for those regulated by these Sanitary Norms (Zapolsky, 2005; Dehazatsiya vody, 2025).

The indicators of total alkalinity, color, and turbidity in carbonated drinking water are determined before carbonation or after degasification.

The transportation of water from the water intake points to the bottling locations at the raw drinking water production plants must be carried out exclusively through pipelines.

The storage time of drinking water at filling points in stationary containers should not exceed 24 hours, while in transport containers (tank trucks) it should not exceed 6 hours. The storage time of drinking water may be extended based on the results of sanitary-epidemiological studies, provided that it undergoes additional disinfection before being bottled for consumers, using methods that do not contaminate the drinking water with residual concentrations of reagents.

It is prohibited to fill containers with drinking water that contain remnants of drinking water.

The shelf life and storage conditions of bottled drinking water are established based on the results

of the state sanitary and epidemiological expertise of the water. Bottled drinking water must be stored in places protected from direct sunlight.

Reusable polymer containers and containers that arrive at the filling line from the storage warehouse must be washed, disinfected, and rinsed with the drinking water intended for bottling in these containers, according to the technological regulations or other documents describing the technological process of bottled drinking water production, which specifies the usage period for reusable containers.

The release of bottled drinking water that has been treated with ozone during water preparation from the finished goods warehouse must take place no earlier than 8 hours after the water has arrived at the warehouse (Honcharuk, 2016; Kovaliova, 2014; Honcharuk, 2015; Dytrieva, 2015; Hryhorenko, 2019).

During the design and construction of new drinking water production facilities or the reconstruction of existing ones, separate filling lines for bottling drinking water and non-alcoholic beverages must be provided.

At existing plants that use a single filling line, before changing the type of product, the filling line must undergo a sanitary treatment using cleaning and disinfecting agents, followed by rinsing with water at a temperature not lower than 80°C and drinking water intended for bottling, following the technological regulations or other documents describing the technological process of drinking water production.

After sanitary treatment, production control of the first batch of products is carried out according to the full production control program.

At the drinking water filling points, an informational sheet must be available, containing details about the type of water (treated, untreated (natural), artificially mineralized, artificially fluoridated, artificially iodized, with optimal mineral content, carbonated or non-carbonated, etc.), its composition ("drinking water" and a list of added substances, including preservatives, macro- and microelements), storage conditions, manufacturing date, the name, address, and phone number of the manufacturer and the place of production, the type of source water, the location of the underground drinking water source, the well number and depth, and references to the normative document under which the drinking water was produced.

The location for the sale of drinking water from filling points should be situated on an area with a solid surface, which is organized and well-maintained, and is located at least 50 meters away from sources of contamination such as waste bins, toilets, major roads with heavy traffic, parking lots, etc. It should have a counter with a metal faucet connected to a pipeline for dispensing drinking water (the faucet should be positioned above the counter at a height of at least 0.5 meters).

It is prohibited to lay a bypass pipeline from the drinking water supply network to the water dispensing faucet for consumers.

The requirements for drinking water from wells, boreholes, and water intakes (decentralized drinking water supply for the population) are as follows. The construction of wells, boreholes, and water intakes must be carried out based on the results of laboratory studies on the safety and quality of the underground water to be used, as well as the sanitary-epidemiological survey of the area where these structures are located, conducted by institutions and establishments of the state sanitary and epidemiological service.

The results of geological and hydrogeological studies, as well as laboratory studies on the safety and quality of underground water (if available), should be submitted to the state sanitary and epidemiological service of the respective administrative territory. These results must include information on the depth of underground water, the direction of its flow within the area of the settlement, the approximate thickness of the water-bearing layer, the potential interaction with existing or planned water intakes at neighboring sites, and with surface water bodies (such as ponds, swamps, reservoirs, rivers, etc.), as well as actual values of safety and quality indicators for the underground water (Babienko, 2021; Honcharuk, 2016; Kovaliova, 2014).

The results of the sanitary-epidemiological survey of the area must include information about the local natural conditions, a description of the area where the water intake is located, indicating existing and potential sources of microbial, parasitic, and chemical contamination.

The locations for the construction of wells, boreholes, and water intakes should be situated on clean and protected land, located upstream of the groundwater flow, at least 30 meters away from roads with heavy traffic and at least 50 meters (for individual wells, at least 20 meters) from toilets,

cesspits, sewage facilities and networks, fertilizer and pesticide storage sites, livestock enclosures, and other places of soil and groundwater contamination.

The area around the well, water intake, or public well should be kept clean, and surface runoff should be properly managed.

Within a 50-meter radius of wells, boreholes, and water intakes, it is prohibited to wash vehicles, allow animals to drink water, create ponds for waterfowl, or place devices for preparing pesticides, as well as engage in any activities that could lead to soil and water contamination.

It is also forbidden to construct wells, boreholes, and water intakes in areas that are prone to flooding, erosion, landslides, or other forms of deformation, as well as in low-lying and swampy areas.

It is prohibited to use containers brought by consumers for raising water from wells or water intakes meant for public use, as well as to draw water with common-use buckets or utensils belonging to consumers.

For insulating and protecting wells and water intakes from freezing, materials such as foam concrete, clean straw mats, hay, shavings, etc., can be used, but these materials should not come into contact with the water intake. The use of manure, compost, or other similar substances for this purpose is prohibited.

Newly constructed wells, boreholes, and water intakes can only be put into operation after inspection by an official from the state sanitary and epidemiological service of the respective administrative territory and after completing the Sanitary Passport.

The Sanitary Passport is filled out by the owner of the well, borehole, or water intake, together with the official from the state sanitary and epidemiological service of the respective administrative territory, in two copies, both of which are signed. One copy of the Sanitary Passport is kept at the state sanitary and epidemiological service of the respective administrative territory, and the second copy remains with the owner of the facility. The extension of the Sanitary Passport's validity is registered annually in both copies (Khilchevsky, 2015; Prokopov, 2016; Zasyпка, 2018).

High levels of turbidity can protect microorganisms from the action of disinfectants, promote bacterial growth, and cause significant chlorine consumption. Therefore, in all disinfection processes, to ensure their effectiveness, turbidity must always be kept low (Kovaliova, 2014; Malyna, Liasot, 2020).

Conclusions. This work examines the main requirements for drinking water, including sanitary-chemical and radiological safety indicators, as well as epidemic safety parameters. The types of water, its quality, and methods for improvement are analyzed. It has been established that adherence to regulated water

quality requirements is a key factor in producing safe and high-quality beverages and concentrates. The use of effective water purification and control methods not only ensures compliance with sanitary and hygiene standards but also preserves the organoleptic properties of the product at a high level.

BIBLIOGRAPHY:

1. Андрусишина І. М. Вплив мінерального складу питної води на стан здоров'я населення: Вода і водоочисні технології : Навчальний посібник. Київ : Інститут медицини праці імені Ю. І. Кундієва. 2015. 31 с.
2. Вимоги до якості питної води. URL: <https://ecosoft.ua/ua/blog/trebovaniya-k-kachestvu-pitevoy-vody/> (дата звернення 25.03.2025)
3. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» Закон України від 12.05.2010 № 400. Міністерство охорони здоров'я України. 2022. С. 18–40.
4. Методичні вказівки до проведення практичних занять зі студентами біолого-технологічного факультету. Фізичні, хімічні та біологічні показники якості води / Розробники Малина В. В, Лясота В. П., Гришко В. А. Біла Церква : Білоцерківський національний аграрний університет, 2014. 45 с.
5. Методичні вказівки до проведення практичних занять зі студентами біолого-технологічного факультету. Фізичні, хімічні та біологічні показники якості води / Розробники Малина В. В, Лясота В. П. Біла Церква : Білоцерківський національний аграрний університет, 2020. 56 с.
6. ДСТУ 7525: 2014. Вода питна. Вимоги та контролювання якості. [Чинний від 2014-10-23]. Київ, 2014. 25 с. (Інформація та документація).
7. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною: ДСанПіН 2.2.4-171-10. Оф. вид. Київ : М-во охорони здоров'я України, 2010. 74 с.
8. Прокопов В. О. Оцінка якості питної води з підземних вододжерел України з погляду впливу на стан здоров'я населення. Київ. *Науковий вісник НМУ*. 2012. № 3. 126–132 с.
9. ДСТУ 4107-2002 Якість води. Відбирання проб. Настанови щодо біотестування проб (ISO 5667-16:1998, MOD). [Чинний від 04.12.2009] Вид. офіц. Київ : «УкрНДІЕП», 2009. 53 с.
10. Григоренко Л. В. Еколого-гігієнічна оцінка впливу питної води з централізованих, децентралізованих джерел водопостачання та доочищеної питної води на здоров'я сільського населення Дніпропетровської області. Київ : Інститут громадського здоров'я ім. О. М. Марзєєва НАМН України, 2019. 342 с.
11. Бабієнко В. В. Гігієна води та водопостачання населених місць : Навчальний посібник. Одеса : Прес-кур'єр, 2021. 372 с.
12. Запольський, А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води : підручник. Київ : Вища шк., 2005. 671 с.
13. Дегазація води. URL: <https://studfile.net/preview/5725871/page:18/> (дата звернення 20.03.2025).
14. Гончарук В. В., Скубченко В. Ф., Чернявская А. П., Мешкова Клименко Н. А. Джерела централізованого водовідведення, гігієнічні і екологічні вимоги к якості води : Матеріали науково-практичного семінару «Актуальні питання якості води в Україні». Київ, 2016. 56 с.
15. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Санітарногігієнічні основи спеціальності» до спеціальності «Водопостачання та водовідведення» / уклад.: О. О. Ковальова, О. В. Булгакова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. 46 с.
16. Гончарук В. В., Жупинский В. Н., Чернявская А. П., Скубченко В. Ф. Розробка еколого-гігієнічної класифікації якості поверхневих вод України. Київ : ІКХХВ НАН України, 2015. 157 с.
17. Дмитрева О. О., Ігнатенко Л. Г., Колдоба І. В. Соціально-екологічні проблеми якості води : Навч. посіб. Харків : Техніка, 2015. 50 с.
18. Хільчевський В. К. Основні засади управління якістю водних ресурсів та їхня охорона: Навчальний посібник. Київ : ВПЦ Київський університет. 2015. 154 с.
19. Прокопов В. О. Питна вода України: медико-екологічні та санітарно-гігієнічні аспекти. Київ : ВСВ «Медицина», 2016. 400 с.
20. Засипка, А. М., Кільдишева, О. В Актуальні питання санітарногігієнічної регламентації у водопостачанні. Київ : *Науково-практичний журнал*. 2018. № 4. 208–212 с.

REFERENCES:

1. Andrusyshyna, I. M. (2015). *Vplyv mineralnoho skladu pytnoi vody na stan zdorovia naseleennia: Voda i vodoochysni tekhnologii: Navchalnyi posibnyk*. [Influence of the Mineral Composition of Drinking Water on the State of Public Health: Water and Water Purification Technologies]. Kyiv : Instytut medytsyny pratsi imeni Yu. I. Kundieva [in Ukrainian].

2. Vymohy do yakosti pytnoi vody [Requirements for Drinking Water Quality]. (n.d.). *base.garant.ru*. Retrieved from: <https://ecosoft.ua/ua/blog/trebovaniya-k-kachestvu-pitevoy-vody/> [in Ukrainian].
3. *Zakon Ukrainy pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl "Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoї dlia spozhyvannia liudynoiu": pryiniaty 5 tr. 2010 roku № 400 [Law of Ukraine on the Approval of State Sanitary Norms and Rules "Hygienic Requirements for Drinking Water Intended for Human Consumption": Adopted May 5, 2010, No. 400]*. (2022). Ministerstvo okhorony zdorovia Ukrainy, 400, pp. 18–40 [in Ukrainian].
4. Malyna, V. V., Liasota, V. P., & Hryshko, V. A. (2014). *Metodychni vkazivky do provedennia praktychnykh zaniat zi studentamy bioloho-tekhnologichnoho fakultetu. Fizychni, khimichni ta biolohichni pokaznyky yakosti vody [Methodological Guidelines for Conducting Practical Classes with Students of the Faculty of Biology and Technology. Physical, Chemical, and Biological Indicators of Water Quality]*. Bila Tserkva: Bilotserkivskyi natsionalnyi ahrarnyi universytet [in Ukrainian].
5. Malyna, V. V., & Liasota, V. P. (2020). *Metodychni vkazivky do provedennia praktychnykh zaniat zi studentamy bioloho-tekhnologichnoho fakultetu. Fizychni, khimichni ta biolohichni pokaznyky yakosti vody [Methodological Guidelines for Conducting Practical Classes with Students of the Faculty of Biology and Technology. Physical, Chemical, and Biological Indicators of Water Quality]*. Bila Tserkva : Bilotserkivskyi natsionalnyi ahrarnyi universytet [in Ukrainian].
6. Voda pytna. Vymohy ta kontroliuvannia yakosti [Drinking Water. Requirements and Quality Control]. (2014). *DSTU ISO 7525:2014 from 23th October 2014*. Kyiv : Derzhstandart Ukraine [in Ukrainian].
7. *Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoї dlia spozhyvannia liudynoiu: DSANPIN 2.2.4-171-10 [Hygienic Requirements for Drinking Water Intended for Human Consumption: DSANPIN 2.2.4-171-10]*. (2010). Kyiv : M-vo okhorony zdorovia Ukrainy [in Ukrainian].
8. Prokopov, V. O. (2012). Otsinka yakosti pytnoi vody z pidzemnykh vododzherel Ukrainy z pohliadu vplyvu na stan zdorovia naselennia [Assessment of Drinking Water Quality from Underground Water Sources in Ukraine from the Perspective of Impact on Public Health]. *Naukovyi visnyk NMU – Scientific Bulletin of NMU*, 3, 126-132 [in Ukrainian].
9. Yakist vody. Vidbyrannia prob. Nastanovy shchodo biotestuvannia prob. [Water Quality. Sampling. Guidelines for Biotesting of Samples]. (2009). *DSTU ISO 4107-2002 from 04th December 2009*. Kyiv : "UkrNDIEP" [in Ukrainian].
10. Hryhorenko, L. V. (2019). *Ekoloho-hihienichna otsinka vplyvu pytnoi vody z tsentralizovanykh, detsentralizovanykh dzherel vodopostachannia ta doochyshchenoi pytnoi vody na zdorovia silskoho naselennia Dnipropetrovskoi oblasti. [Ecological and Hygienic Assessment of the Impact of Drinking Water from Centralized and Decentralized Water Supply Sources and Purified Drinking Water on the Health of the Rural Population of the Dnipropetrovsk Region]*. Kyiv : Instytut hromadskoho zdorovia im. O. M. Marzieieva NAMN Ukrainy [in Ukrainian].
11. Babienko, V. V. (2021). *Hihiena vody ta vodopostachannia naselenykh mist [Water Hygiene and Water Supply of Human Settlements]*. Odesa : Pres-kurier, [in Ukrainian].
12. Zapolskyi, A. K. (2005). *Vodopostachannia, vodovidvedennia ta yakist vody [Water Supply, Wastewater Disposal, and Water Quality]*. Kyiv : Vyshcha shk. [in Ukrainian].
13. Dehazatsiya vody [Water Degasification] (n.d.). *base.garant.ru*. Retrieved from: <https://studfile.net/preview/5725871/page:18/> [in Ukrainian].
14. Honcharuk, V. V., Skubchenko, V. F., Cherniavska, A. P., & Meshkova Klymenko, N. A. (2016). *Dzherela tsentralizovanoho vodovidvedennia, hihienichni i ekolohichni vymohy k yakosti vody [Sources of Centralized Wastewater Disposal, Hygienic and Ecological Requirements for Water Quality]*. Kyiv [in Ukrainian].
15. Kovaliova, O. O., & Bulhakova, O. V. (2014). *Metodychni vkazivky do praktychnykh zaniat z dystsypliny "Sanitarnohihienichni osnovy spetsialnosti" do spetsialnosti "Vodopostachannia ta vodovidvedennia" [Methodological Guidelines for Practical Classes in the Discipline "Sanitary and Hygienic Fundamentals of the Specialty" for the Specialty "Water Supply and Wastewater Disposal"]*. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova [in Ukrainian].
16. Honcharuk, V. V., Zhupynskyi, V. N., Cherniavska, A. P., & Skubchenko, V. F. (2015). *Rozrobka ekolo-hohihienichnoi klasyfikatsii yakosti poverkhnevnykh vod Ukrainy [Development of an Ecological and Hygienic Classification of the Quality of Surface Waters of Ukraine]*. Kyiv : IKHHV NAN Ukrainy [in Ukrainian].
17. Dytrieva, O. O., Ihnatenko, L. H., & Koldoba, I. V. (2015). *Sotsialno-ekolohichni problemy yakosti vody [Socio-Ecological Problems of Water Quality]*. Kharkiv : Tekhnyka [in Ukrainian].
18. Khilchevskyi, V. K. (2015). *Osnovni zasady upravlinnia yakisti vodnykh resursiv ta yikhnia okhorona [Basic Principles of Water Resource Quality Management and Their Protection]*. Kyiv : VPTs Kyivskyi universytet [in Ukrainian].
19. Prokopov, V. O. (2016). *Pytna voda Ukrainy: medyko-ekolohichni ta sanitarno-hihienichni aspekty [Drinking Water of Ukraine: Medico-Ecological and Sanitary-Hygienic Aspects]*. Kyiv : VSV "Medytsyna" [in Ukrainian].
20. Zasyпка, A. M., & Kildysheva, O. V. (2018). Aktualni pytannia sanitarno-hihienichnoi rehlamentatsii u vodopostachanni [On Current Issues of Sanitary and Hygienic Regulation in Water Supply]. *Naukovo-praktychnyi zhurnal – Scientific and Practical Journal*, 4, 208–212 [in Ukrainian].

УДК 544.344:547.475.5

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-5>

Віталія СЕМЕНЮК

аспірантка кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0009-0008-3330-9393

Орися БЕРЕЗНЮК

доктор філософії в галузі хімії, старший викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0009-0004-9191-0516

Олена КЛИМОВИЧ

кандидат хімічних наук, завідувач сектору, Волинський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, вул. Винниченка, 43, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43006

Інна ІВАЩЕНКО

кандидат хімічних наук, Краківський політехнічний університет, вул. Варшавська, 24, м. Краків, Польща, 31-155

ORCID: 0000-0001-9724-0737

Софія БОДАШКО

магістерка кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Тарас ОСТАП'ЮК

кандидат хімічних наук, начальник цеху, СП ТОВ «Модерн-Експо», вул. Рівненська, 4, с. Струмівка, Волинська обл., Україна, 45603

Людмила ПІСКАЧ

кандидат хімічних наук, професор кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0003-3117-4006

Бібліографічний опис статті: Семенюк, В., Березнюк, О., Климович, О., Іващенко, І., Бодашко, С., Остап'юк, Т., Піскач, Л. (2025). Діаграми стану систем $C_2^{III}X_3 - D^{IV}X_2$ ($C^{III} - As, Sb, Bi$; $D^{IV} - Ge, Sn$; $X - S, Se$). *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 34–44, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-5>

**ДІАГРАМИ СТАНУ СИСТЕМ $C_2^{III}X_3 - D^{IV}X_2$
($C^{III} - As, Sb, Bi$; $D^{IV} - Ge, Sn$; $X - S, Se$)**

У роботі представлено результати експериментальних досліджень фазових діаграм квазіподвійних систем типу $C_2^{III}X_3 - D^{IV}X_2$, де $C^{III} - As, Sb, Bi$; $D^{IV} - Ge, Sn$; $X - S, Se$. Синтез зразків здійснено із високочистих простих речовин шляхом прямого сплавлення у вакуумованих ампулах; максимальна температура 1170 К. Для ідентифікації фаз, визначення складу та характеру фазових переходів застосовано методи порошкового рентгенофазового та диференційно-термічного аналізу.

Побудовано та проаналізовано діаграми стану, які характеризуються різними типами неваріантних процесів: перитектичним та евтектичним. У сульфідній системі $As_2S_3 - GeS_2$ встановлено перитектичний тип взаємодії (при 722 К) з обмеженою взаємною розчинністю компонентів у твердому стані; у аналогічній селеновмісній системі $As_2Se_3 - GeSe_2$ спостерігається евтектичний тип взаємодії (618 К, 20 мол. % $GeSe_2$). У системі

$\text{Sb}_2\text{S}_3 - \text{GeSe}_2$ виявлено евтектичний тип взаємодії з евтектичною точкою при 747 K і 35 мол.% GeSe_2 ; зафіксовані склоподібні та склокристалічні фази у проміжному діапазоні складів, що свідчить про тенденцію до склоутворення. Селенідна система $\text{Sb}_2\text{Se}_3 - \text{GeSe}_2$ аналогічно демонструє евтектичну взаємодію з координатами евтектичної точки: 757 K, 58 мол. % GeSe_2 ; відсутність твердих розчинів та склоподібного стану. Переріз $\text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{GeSe}_2$ також належить до евтектичного типу (860 K; 52 мол. % GeSe_2) з утворенням твердих розчинів на основі вихідних компонентів.

В системах з участю станум (IV) сульфідів та селенідів зафіксовано евтектичні: $\text{As}_2\text{Se}_3 - \text{SnSe}_2$ (при 640 K, 19 мол. % SnSe_2), $\text{Sb}_2\text{S}_3 - \text{SnS}_2$ (при 737 K, 65 мол.% Sb_2S_3), $\text{Sb}_2\text{Se}_3 - \text{SnSe}_2$ (при 773 K, 50 мол.% SnSe_2), $\text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{SnS}_2$ (при 938 K, 42 мол.% SnS_2), $\text{Bi}_2\text{Se}_3 - \text{SnSe}_2$ (при 831 K, 67 мол.% SnSe_2) та перитектичний $\text{As}_2\text{S}_3 - \text{SnS}_2$ (при 727 K) типи взаємодії. У системі $\text{Sb}_2\text{S}_3 - \text{SnS}_2$ ідентифікована тернарна фаза Sb_2SnS_5 , що утворюється інконгруентно за реакцією $\text{L} + \text{SnS}_2 \leftrightarrow \text{Sb}_2\text{SnS}_5$ при 765 K, тоді як у селенідних системах тернарні фази не виявлено, що вказує на вплив хімічного зв'язку та структурних факторів на стабільність фаз.

Окрім цього в окремих системах зафіксовано евтектоїдні та перитектоїдні перетворення, що пов'язані з фазовими переходами GeSe_2 та SnS_2 .

Отримані результати є важливими для подальшого дослідження квазіпотрійних систем на основі вказаних бінарних сполук і створення матеріалів з контрольованими властивостями для електроніки, фотоніки та енергетики.

Ключові слова: рентенофазовий аналіз, диференційно-термічний аналіз, фазові діаграми, евтектика, перитектика.

Vitaliia SEMENIUK

Postgraduate Student at the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0009-0008-3330-9393

Orysia BEREZNIUK

Doctor of Philosophy in Chemistry, Senior Lecturer at the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0009-0004-9191-0516

Olena KLYMOVYCH

Candidate of Chemical Sciences, Head of Sector, Volyn Scientific Research Forensic Expert Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, 43 Vynnychenka str., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43006

Inna IVASHCHENKO

Candidate of Chemical Sciences, Krakow University of Technology, 24 Varshavska str., Krakow, Poland, 31-155

ORCID: 0000-0001-9724-0737

Sofia BODASHKO

Master's degree at the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

Taras OSTAPIUK

Candidate of Chemical Sciences, Head of the Workshop, JV LLC «Modern-Expo», 4 Rivnenska str., Strumivka village, Volyn region, Ukraine, 45603

Lyudmyla PISKACH

Candidate of Chemical Sciences, Professor at the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0003-3117-4006

To cite this article: Semenyuk, V., Berezniuk, O., Klymovych, O., Ivashchenko, I., Bodashko, S., Ostapiuk, T., Piskach, L. (2025). Phase diagrams of the $\text{C}_2^{\text{III}}\text{X}_3 - \text{D}^{\text{IV}}\text{X}_2$ systems ($\text{C}^{\text{III}} - \text{As, Sb, Bi}$; $\text{D}^{\text{IV}} - \text{Ge, Sn}$; $\text{X} - \text{S, Se}$) [Diaqramy stanu system $\text{C}_2^{\text{III}}\text{X}_3 - \text{D}^{\text{IV}}\text{X}_2$ ($\text{C}^{\text{III}} - \text{As, Sb, Bi}$; $\text{D}^{\text{IV}} - \text{Ge, Sn}$; $\text{X} - \text{S, Se}$)]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 34–44, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-5>

PHASE DIAGRAMS OF THE $C_2^{III}X_3 - D^{IV}X_2$ SYSTEMS ($C^{III} - As, Sb, Bi$; $D^{IV} - Ge, Sn$; $X - S, Se$)

The results of experimental studies of phase diagrams of quasi-binary systems of the $C_2^{III}X_3 - D^{IV}X_2$ type are presented where $C^{III} - As, Sb, Bi$; $D^{IV} - Ge, Sn$; $X - S, Se$. The samples were synthesized by direct co-melting of high-purity elements in evacuated ampoules; the maximum temperature was 1170 K. The methods of powder X-ray diffraction and differential thermal analysis were used to identify the phases, determine the composition and nature of phase transitions.

Investigated phase diagrams are characterized by different types of invariant processes, either peritectic or eutectic. The sulfide system $As_2S_3 - GeS_2$ features peritectic interaction at 722 K with limited mutual solubility of the components in the solid state; a eutectic type of interaction was observed in the similar selenium-containing system $As_2Se_3 - GeSe_2$ (618 K, 20 mol.% $GeSe_2$). The $Sb_2S_3 - GeS_2$ system features eutectic type of interaction with the eutectic point at 747 K and 35 mol.% GeS_2 ; glassy and glass-crystalline phases were observed in the intermediate range of compositions, which indicates a tendency to glass formation. The selenide system $Sb_2Se_3 - GeSe_2$ similarly exhibits eutectic interaction with the eutectic point coordinates of 757 K, 58 mol.% $GeSe_2$, absent of solid solutions and glassy state. The $Bi_2S_3 - GeS_2$ section is also of the eutectic type (860 K; 52 mol.% GeS_2) with the formation of solid solution ranges of the initial components.

The systems involving tin (IV) sulfide and selenide exhibit eutectic: $As_2S_3 - SnS_2$ (640 K, 19 mol.% SnS_2), $Sb_2S_3 - SnS_2$ (737 K, 65 mol.% Sb_2S_3), $Sb_2Se_3 - SnSe_2$ (773 K, 50 mol.% $SnSe_2$), $Bi_2S_3 - SnS_2$ (938 K, 42 mol.% SnS_2), $Bi_2Se_3 - SnSe_2$ (831 K, 67 mol.% $SnSe_2$) and peritectic: $As_2S_3 - SnS_2$ (727 K) types of interactions. The $Sb_2S_3 - SnS_2$ system features the ternary phase Sb_2Sn_5 which is formed by the peritectic reaction $L + SnS_2 \leftrightarrow Sb_2Sn_5$ at 765 K, while no ternary phases were found in selenide systems, indicating the effect of chemical bonding and structural factors on the stability of the phases.

Additionally, eutectoid and peritectoid transformations associated with the phase transitions of GeS_2 and SnS_2 were recorded in some systems.

Obtained results are important for further research into the quasi-ternary systems based on these binary compounds and the development of materials with controlled properties for electronics, photonics, and energy production.

Key words: X-ray phase analysis; differential thermal analysis; phase diagrams; eutectic; peritectic.

Вступ. Халькогенідні матеріали привертають значну увагу дослідників завдяки унікальним фізико-хімічним властивостям, які є перспективними в сучасних технологіях – від інфрачервоної оптики до фазових перемикачів пам'яті (Messina, Nair M. & Nair P., 2009; Анатичук, 1979; Srikanth, Suriyanarayanan, Prabahar, Balasubramanian & Kathirvel, 2011; Козьма, Переш, Барчій, Сабов, Габорець & Кун, 2014; Nikolic & Popovic, 1979; Inoue, Matsuda & Murase, 1991; Burton, Whittles, Hesp, Linhart, Skelton, Hou & Webster, 2016). Особливий інтерес становлять системи, до складу яких входять халькогеніди тривалентних Арсену, Стибію, Вісмуту та чотиривалентних Германію та Стануму елементів. Сполуки цих елементів із халькогенами (S, Se) утворюють стабільні фазові сполуки з переважно ковалентним характером зв'язків, що забезпечує високу термічну та хімічну стабільність і дозволяє варіювати функціональні характеристики шляхом змін у складі. Комплексне дослідження взаємодій у таких системах є важливим для глибшого розуміння процесів кристалізації, склоутворення та фазових перетворень, що лежать в основі створення матеріалів із заданими функціональними властивостями. Незважаючи на наявність численних робіт, присвячених окремим подвійним

та потрійним халькогенідним системам, експериментальні дані щодо взаємодій в квазіподвійних системах типу $C_2^{III}X_3 - D^{IV}X_2$, де $C^{III} - As, Sb, Bi$; $D^{IV} - Ge, Sn$; $X - S, Se$ залишаються обмеженими. З дванадцяти можливих перерізів цих систем досліджено лише окремі: $As_2S(Se)_3 - GeS(Se)_2$, $Sb_2S(Se)_3 - GeS(Se)_2$, $Bi_2S_3 - GeS_2$, $Sb_2S_3 - SnS_2$. Для решти систем експериментальні дані є обмеженими або зовсім відсутніми, що ускладнює побудову повних фазових діаграм і обмежує можливості прогнозування їхніх термодинамічних властивостей.

Метою роботи є систематизація відомих в літературі фазових взаємодій та експериментальне дослідження характеру рівноваг у невідомих квазіподвійних системах $C_2^{III}X_3 - D^{IV}X_2$.

Отримані результати становлять фундаментальну основу для оптимізації складів халькогенідних матеріалів з регульованими функціональними характеристиками, зокрема для потреб оптоелектроніки та сенсорних технологій.

Сполуки тривалентних Арсену, Стибію, Вісмуту – As_2S_3 , As_2Se_3 , Sb_2S_3 , Sb_2Se_3 , Bi_2S_3 , Bi_2Se_3 та чотиривалентних Германію, Стануму – GeS_2 , $GeSe_2$, SnS_2 , $SnSe_2$ – характеризуються конгруентним типом плавлення. Вони мають вузькі області гомогенності, що сприяє їх використанню як вихідних компонентів для побудови

Таблиця 1

Кристалографічні характеристики та температури плавлення бінарних сполук

Сполука	$T_{пл}, T_{фн}^*, K$	ПГ	Сингонія	Параметри ґратки, нм			Література
				<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
As ₂ S ₃	592 K [8]	<i>P2₁/n</i>	моноклінна	1,1475	0,9577	0,4256	[9]
As ₂ Se ₃	583 K [8]	<i>P2₁/n</i>	моноклінна	1,20774	0,99037	0,42835	[10]
Sb ₂ S ₃	819 K [8]	<i>Pnma</i>	ромбічна	1,1311	0,3836	1,1229	[11]
Sb ₂ Se ₃	863 K [8]	<i>Pnma</i>	ромбічна	1,1805	0,39877	1,16623	[12]
Bi ₂ S ₃	1048 K [13]	<i>Pnma</i>	ромбічна	1,1282	0,39728	1,1131	[14]
Bi ₂ Se ₃	998 K [15]	<i>R-3m</i>	тригонал.	0,41404	...	2,8640	[16]
BTM-GeSe ₂	1113 K;	<i>P2₁/c</i>	моноклінна	0,6720	1,6101	1,1436	[18]
HTM-GeSe ₂	770–793 K* [17]	<i>Pc</i>	моноклінна	0,6875	2,255	0,6809	[19]
GeSe ₂	1013 K [20]	<i>P2₁/c</i>	моноклінна	0,7036	1,6832	1,181	[21]
		<i>Fdd2</i>	ромбічна	0,692	1,221	2,31	[22]
		<i>I-42d</i>	тетрагон.	0,55073	...	0,99374	[23]
HTM-SnS ₂	1143 K [24]	<i>R-3m</i>	тригонал.	0,36163	...	0,5682	[25]
BTM-SnS ₂		<i>P6₃mc</i>	гексагонал.	0,3645	...	1,1802	[26]
SnSe ₂	948 K [27]	<i>R-3m</i>	тригонал.	0,3811	...	0,6141	[28]

$T_{пл}$ – температура плавлення; $T_{фн}^*$ – температура фазового перетворення; ПГ – просторова група

квазіподвійних систем. Кристалографічні характеристики зазначених сполук, а також їх температури плавлення наведено в табл. 1.

Експериментальна частина. Компонування зразків для експериментального дослідження систем As₂S(Se)₃ – SnS(Se)₂, Sb₂Se₃ – SnSe₂, Bi₂S₃ – SnS₂ здійснювали з простих речовин високої чистоти (не менше 99,99 мас.%): сурми, вісмуту, олова, сірки, селену та попередньо синтезованих арсен (III) сульфідів і селенідів. Стехіометричні кількості компонентів завантажували в кварцові ампули, які вакуумували до $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. Синтез проводили в однотемпературному режимі: максимальна температура становила 1170 K, відпал – при 500 K упродовж 500 год; охолодження до кімнатної температури проходило в режимі виключеної печі, що забезпечувало наближення до рівноважного стану твердих фаз.

Дослідження синтезованих зразків здійснювали за допомогою рентгенівського фазового аналізу (РФА) та диференційно-термічного аналізу (ДТА). РФА проводили на дифрактометрі ДРОН 4-13 з використанням CuK α -випромінювання; швидкість сканування кута 2 θ становила 0,05 град, час експозиції в кожній точці 0,5 с. Отримані дифрактограми аналізували для підтвердження ідентичності вихідних сполук та встановлення фазового складу зразків.

ДТА проводили з використанням лабораторної установки, що складається з печі

«Термодент-03» (НТФ «Прогрет», Україна) з можливістю програмованого регулювання температурного режиму, що дозволило встановити температури фазових переходів та уточнити характер взаємодії компонентів у твердому та розплавленому станах.

Результати та їх обговорення. Переріз As₂S₃ – GeSe₂. Авторами роботи (Хімінець, Баранова, Цигика, Добош & Хімінець, 1988) побудовано діаграму стану квазіподвійного перерізу As₂S₃ – GeSe₂ (рис. 1). Вона характеризується перитектичним типом взаємодії із

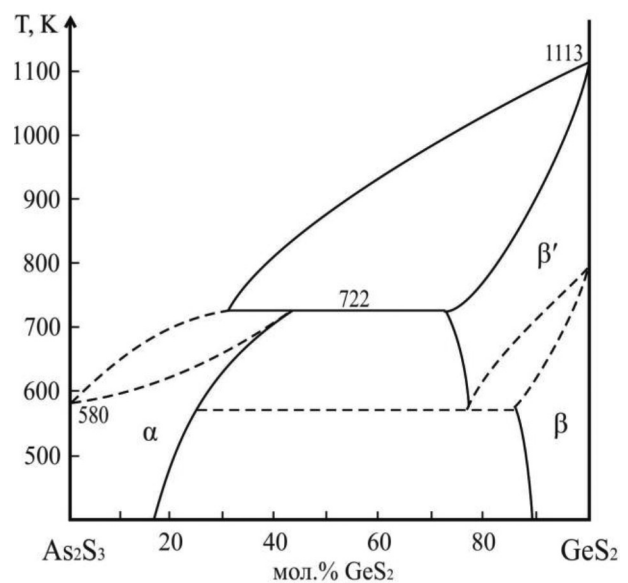


Рис. 1. Діаграма стану системи As₂S₃ – GeSe₂ [29]

значною обмеженою взаємною розчинністю компонентів у твердому стані. При 722 К відбувається перитектичне перетворення $L + \beta' \rightarrow \alpha$, де α , β' – тверді розчини, що кристалізуються на основі As_2S_3 та високотемпературної модифікації GeS_2 відповідно. Поліморфне перетворення від GeS_2 має на діаграмі евтектоїдний характер ($\beta' \leftrightarrow \alpha + \beta$) при температурі ~ 590 К.

Переріз $As_2Se_3 - GeSe_2$. На відміну від сульфідної системи $As_2S_3 - GeS_2$, у якій спостерігається перитектичне перетворення, аналогічна селенідна $As_2Se_3 - GeSe_2$ (рис. 2) (Klymovych, Ivashchenko, Olekseyuk, Zmiy & Lavrynyuk, 2020) характеризується евтектичною взаємодією $L \leftrightarrow \alpha + \beta$, де α , β – тверді розчини на основі вихідних сполук As_2Se_3 та $GeSe_2$; координати евтектичної точки: 618 К і 20 мол. % $GeSe_2$.

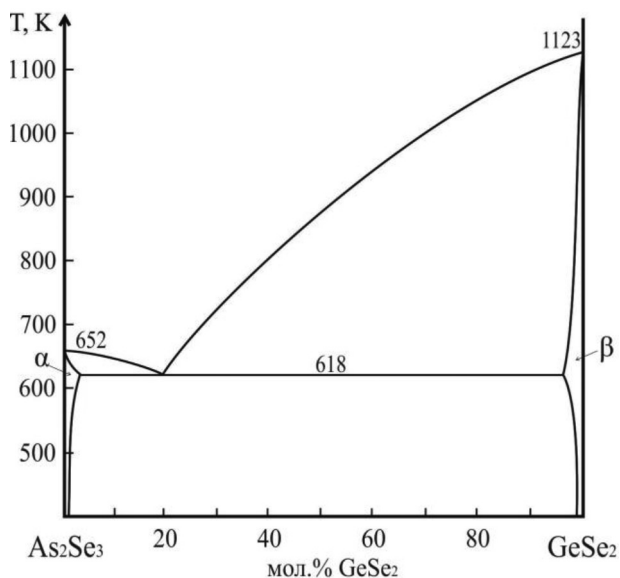


Рис. 2. Діаграма стану системи $As_2Se_3 - GeSe_2$ [30]

Перехід від перитектичної до евтектичної взаємодії свідчить про послаблення хімічної взаємодії між As і Ge у присутності Se, що, ймовірно, зумовлено різницею в електронегативності (2,60 для S та 2,48 для Se за шкалою Полінга) та більшим йонним радіусом Se^{2-} (184 пм порівняно з 170 пм для S^{2-}).

Переріз $Sb_2S_3 - GeS_2$. Взаємодія між Sb_2S_3 та GeS_2 досліджена в неповному концентраційному інтервалі (0–68,28 мол. % GeS_2) в роботі (Tomashyk, 2022), діаграма стану системи не побудована. Відомо, що зразки з вмістом менше 42 мол. % GeS_2 , дають криві охолодження з чіткими та відтворюваними тепловими ефектами, а до 32 мол. % GeS_2 є кристалічними.

При цьому в інтервалі 9,87–18,63 мол. % GeS_2 виявлено склоподібну фазу GeS_2 , в межах 32–42 мол. % GeS_2 отримують склокристали, при вмісті більше 42 мол. % GeS_2 – стекла. Сплави отримували повільним нагріванням суміші компонентів до 673 К в атмосфері азоту. Нами зафіксовано у системі $Sb_2S_3 - GeS_2$ евтектичний тип взаємодії (V тип за класифікацією Розебома), що підтверджено побудованою діаграмою стану (рис. 3) (Березнюк, Семенюк, Кньовець, Когут & Піскач, 2024). Криві первинної кристалізації перетинаються у евтектичній точці з координатами 35 мол. % GeS_2 при 747 К. Нонваріантна рівновага описується взаємодією $L \leftrightarrow \alpha + GeS_2$, де α – граничний твердий розчин на основі вихідного стибію (III) сульфід, який при температурі евтектичного перетворення не перевищує 5 мол. %. Результати також узгоджуються з дослідженнями (Tomashyk, 2022), в яких встановлено наявність склоподібних і склокристаличних зразків у діапазоні 10–50 мол. % GeS_2 . У зразках з вмістом GeS_2 понад 60 мол. % на рентгенограмах спостерігались лише системи рефлексів фази германій (IV) сульфід. Характерна для системи тенденція до склоутворення у проміжному інтервалі складів, ймовірно, обумовлена високою термодинамічною стабільністю GeS_2 та обмеженою розчинністю у α -фазі.

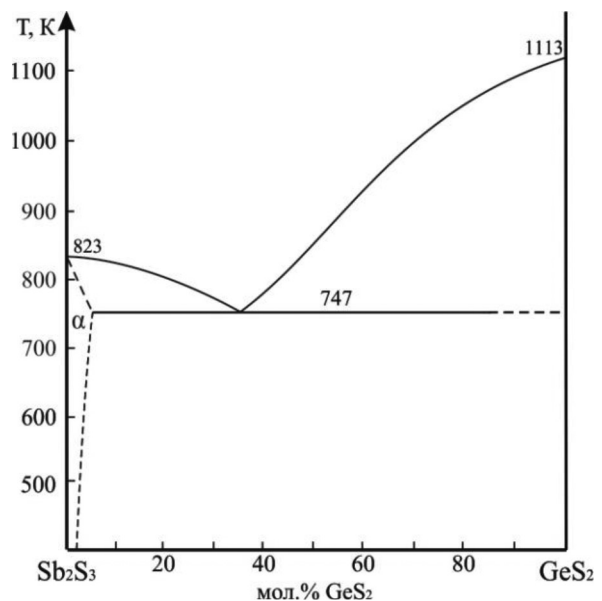


Рис. 3. Діаграма стану системи $Sb_2S_3 - GeS_2$ [32]

Переріз $Sb_2Se_3 - GeSe_2$. Система $Sb_2Se_3 - GeSe_2$ аналогічно демонструє евтектичну взаємодію $L \leftrightarrow Sb_2Se_3 + GeSe_2$ (рис. 4)

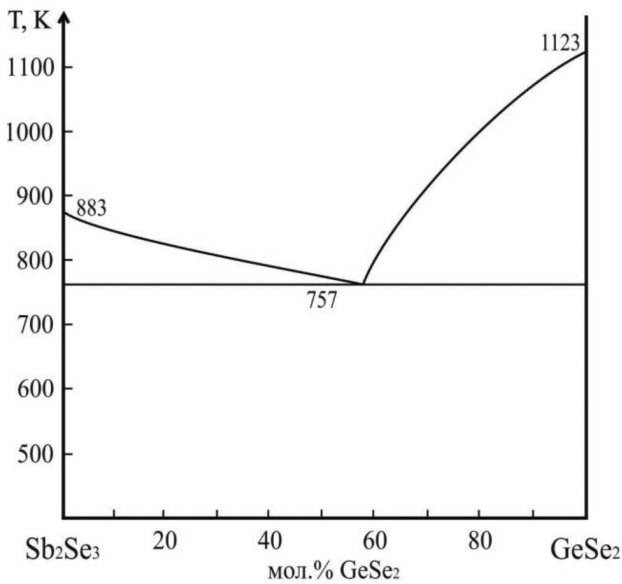


Рис. 4. Діаграма стану системи $\text{Sb}_2\text{Se}_3 - \text{GeSe}_2$ [34]

з координатами евтектичної точки: 757 К, 58 мол. % GeSe_2 (Блецкан, 2004; Dra & Mora Aznar, 1998). Розчинність компонентів у твердому стані є практично відсутньою. Як і у випадку $\text{Sb}_2\text{S}_3 - \text{GeS}_2$, тернарні фази не виявлено, проте в системі $\text{Sb}_2\text{Se}_3 - \text{GeSe}_2$ склоподібний стан не фіксується. Це може бути пов'язано з вищою термодинамічною стабільністю селенідів і менш вираженою тенденцією до утворення аморфної структури.

Переріз $\text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{GeS}_2$. Система $\text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{GeS}_2$ належить до евтектичного типу взаємодії (V тип діаграм стану за Розебомом) (Dra & Mora

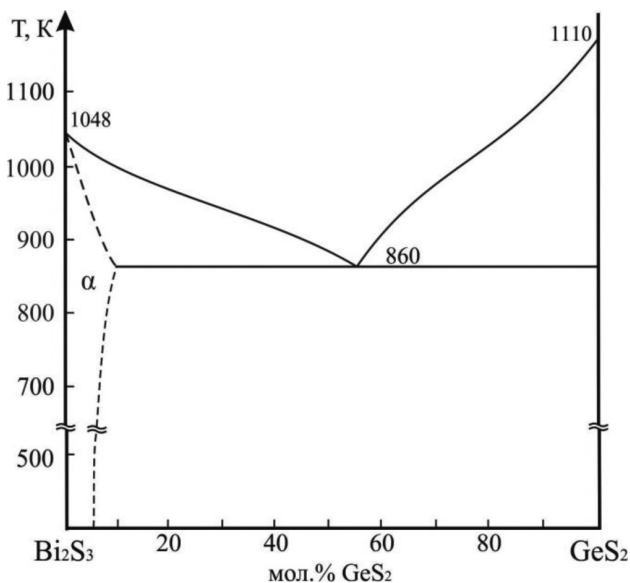


Рис. 5. Діаграма стану системи $\text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{GeS}_2$ [32]

Aznar, 1998). Ліквідус системи (рис. 5) складається з двох ліній, які відповідають кристалізації α -твердого розчину на основі Bi_2S_3 та GeS_2 . Евтектична реакція $L \leftrightarrow \alpha + \text{GeS}_2$ відбувається при температурі 860 К, її склад відповідає 52 мол.% GeS_2 . При цій температурі концентраційна границя α -твердого розчину складає ~10 мол.% GeS_2 . Рентгенофазовий аналіз зразків у межах 10–90 мол. % GeS_2 показав, що після відпау спостерігалися лише дифракційні картини, які відповідали вихідним бінарним фазам.

Переріз $\text{As}_2\text{S}_3 - \text{SnS}_2$. Система $\text{As}_2\text{S}_3 - \text{SnS}_2$ (рис. 6) характеризується перитектичним типом взаємодії з утворенням граничних твердих розчинів α - та β' - на основі As_2S_3 та BTM-SnS_2 відповідно. Перитектичне перетворення $L + \beta' \rightarrow \alpha$ відбувається при температурі 727 К. Область гомогенності α -фази As_2S_3 збільшується із зростанням температури і досягає ~35 мол.% BTM-SnS_2 при температурі перитектики. Водночас тверда фаза SnS_2 проявляє меншу розчинність ~20 мол. % при цій же температурі. Більша розчинність на основі арсен (III) сульфідів обумовлена особливостями її кристалічної структури: аморфна структура демонструє високий ступінь розупорядкування, що сприяє формуванню твердих розчинів при частковому упорядкуванні. Евтектоїдне перетворення $\beta' \leftrightarrow \alpha + \beta$ при 573 К пов'язане з фазовим переходом SnS_2 .

Переріз $\text{As}_2\text{Se}_3 - \text{SnSe}_2$. Фазові рівноваги в системі $\text{As}_2\text{Se}_3 - \text{SnSe}_2$ були вперше досліджені

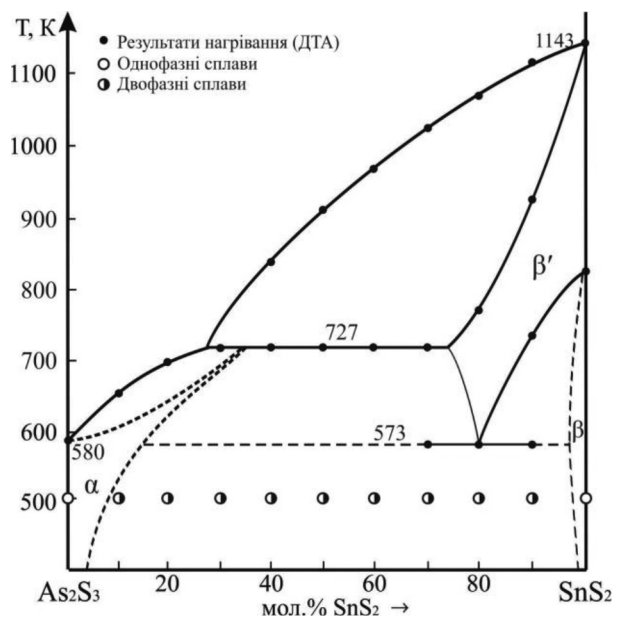


Рис. 6. Діаграма стану системи $\text{As}_2\text{S}_3 - \text{SnS}_2$

авторами (Zmiy, Gulay, Ostapyuk & Klymovych, 2008), проте діаграма стану потребує уточнення. Система (рис. 7) характеризується евтектичним типом взаємодії без утворення нових тернарних фаз і з обмеженою взаємною розчинністю компонентів у твердому стані. Евтектична реакція $L \leftrightarrow \alpha + \beta$ (α , β – тверді розчини на основі As_2Se_3 та $SnSe_2$ відповідно) відбувається при 640 К, а склад евтектичної точки становить 19 мол.% $SnSe_2$.

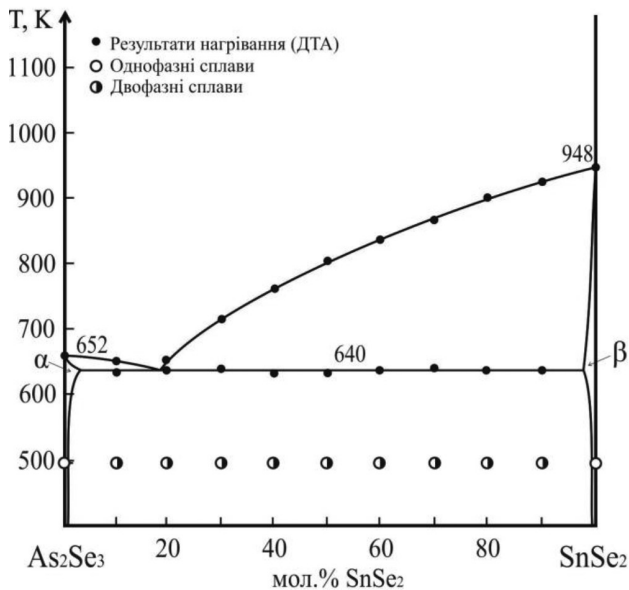


Рис. 7. Діаграма стану системи $As_2Se_3 - SnSe_2$

Переріз $Sb_2S_3 - SnS_2$. У системі $Sb_2S_3 - SnS_2$ було ідентифіковано утворення тернарної фази Sb_2SnS_5 еквімолярного складу, яка формується інконгруентно за реакцією $L + \beta \leftrightarrow Sb_2SnS_5$ (β – твердий розчин на основі SnS_2) при 733 К (Mamedov, 2020) чи 765 К (Березнюк, Смітюх & Піскач, 2023). Кристалічна структура цієї фази наразі не встановлена. Наші дослідження (рис. 8) (Березнюк, Смітюх & Піскач, 2023) показують, що евтектична реакція $L \leftrightarrow \alpha + Sb_2SnS_5$ (α – твердий розчин на основі Sb_2S_3) у системі відбувається при температурі 737 К, а склад евтектичної точки відповідає 65 мол.% Sb_2S_3 , що незначно відрізняється від раніше опублікованих даних (Mamedov, 2020) (718 К і 62 мол.% Sb_2S_3).

Переріз $Sb_2Se_3 - SnSe_2$. Система $Sb_2Se_3 - SnSe_2$ (рис. 9) також належить до евтектичного типу взаємодії $L \leftrightarrow \alpha + \beta$, де α , β – тверді розчини на основі Sb_2Se_3 та $SnSe_2$; координати евтектичної точки: 773 К і 50 мол.% $SnSe_2$. На відміну від сульфідного аналогу $Sb_2S_3 - SnS_2$,

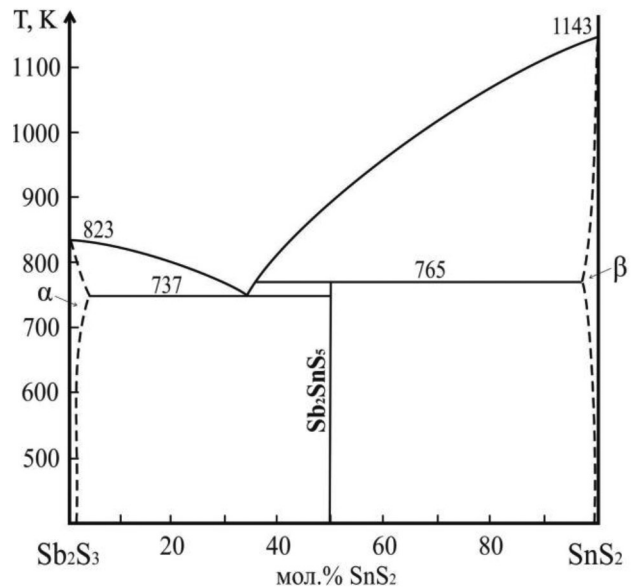


Рис. 8. Діаграма стану системи $Sb_2S_3 - SnS_2$ [37]

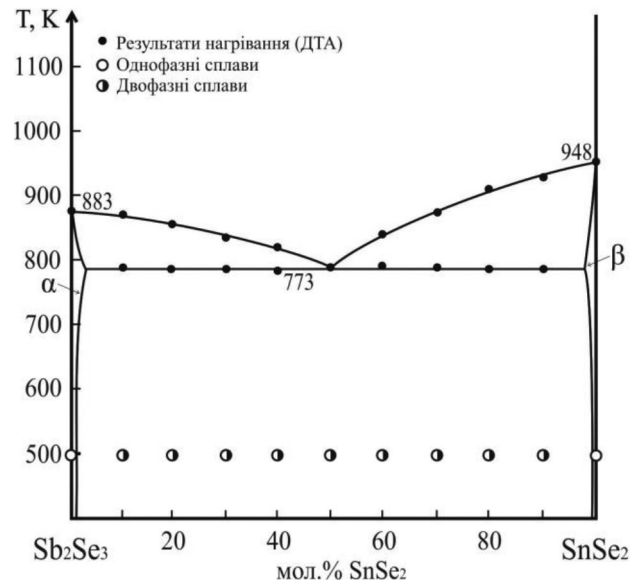


Рис. 9. Діаграма стану системи $Sb_2Se_3 - SnSe_2$

в цій селенідній системі не виявлено утворення тернарних фаз. Така відмінність може бути зумовлена вищою термодинамічною стабільністю селенідів, а також особливостями хімічного зв'язку, зокрема меншою ковалентністю та більшим йонним радіусом Se порівняно з S, що зменшує схильність до утворення аморфних чи проміжних фаз.

Переріз $Bi_2S_3 - SnS_2$. На основі результатів РФА та ДТА побудовано політермічний переріз діаграми стану квазіподвійної системи $Bi_2S_3 - SnS_2$ (рис. 10). Встановлено, що ця система належить до евтектичного типу з характерною реакцією тверднення розплаву $L \leftrightarrow \alpha + \beta'$,

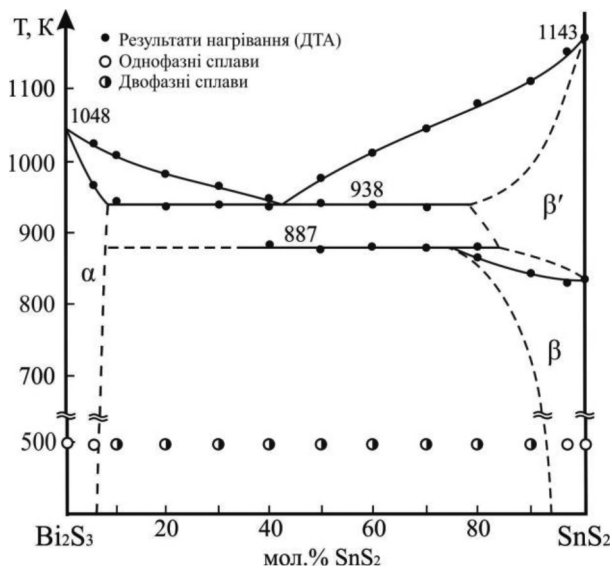


Рис. 10. Діаграма стану системи Bi_2S_3 – SnS_2

де α , β' – тверді розчини, що кристалізуються на основі Bi_2S_3 та високотемпературної модифікації SnS_2 відповідно. Евтектична точка зафіксована при температурі 938 K і складі 42 мол.% SnS_2 . Крім евтектичної реакції, у системі виявлено перитектоїдне перетворення $\alpha + \beta' \leftrightarrow \beta$, що відбувається при температурі 887 K, яке відповідає твердофазному поліморфному переходу на основі SnS_2 .

Висновки. У межах дослідження проаналізовано фазові рівноваги та типи взаємодії на перерізах систем типу $\text{C}^{\text{III}}\text{X}_3$ – $\text{D}^{\text{IV}}\text{X}_2$, де C^{III} – As, Sb, Bi; D^{IV} – Ge, Sn; X – S, Se. Встановлено, що характер взаємодії в системах істотно залежить від природи як катіонних, так і аніонних компонентів. Системи на основі GeX_2 переважно демонструють евтектичний або перитектичний тип взаємодії без утворення тернарних сполук, що зумовлено високою термодинамічною стабільністю $\text{GeS}_2/\text{GeSe}_2$. Для систем з SnX_2 характерна вища реакційна здатність, що проявляється як у формуванні інконгруентно плавкої тернарної фази Sb_2SnS_5 , так і в ширших областях твердих розчинів. Селеніди у більшості випадків демонструють меншу взаємну розчинність та нижчу схильність до утворення тернарних сполук, що пояснюється більшим йонним радіусом і меншою ковалентністю зв'язків Se порівняно з S. Отримані результати становлять фундаментальну основу для подальшого вивчення термодинамічних властивостей, структурного упорядкування та оптичних характеристик стекел і кристалів на основі цих систем. Вони можуть бути використані при розробці матеріалів для оптоелектроніки, сенсорики та інфрачервоної оптики.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Messina S., Nair M. T. S., Nair P. K. Solar cells with Sb_2S_3 absorber films. *Thin Solid Films*. 2009. Vol. 517. P. 2503–2507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.060>
2. Анатичук Л. І. Термоелементи и термоэлектрические устройства. Киев : Наукова думка. 1979. 768 с.
3. Srikanth S., Suriyanarayanan N., Prabakar S., Balasubramanian V., Kathirvel D. Structural and optical properties of chemical bath deposited Sb_2S_3 thin films. *Advanced Applied Science Research*. 2011. Vol. 2, № 1. P. 95–104.
4. Козьма А. А., Переш Є. Ю., Барчій І. Є., Сабов М. Ю., Габорець Н. Й., Кун Г. В. Про взаємозв'язок термоелектричних властивостей бінарних халькогенідів підгрупи арсену з елементарними вихідними компонентами. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Хімія*. 2014. № 1(31). С. 19–24.
5. Nikolic P. M., Popovic Z. V. Some optical properties of GeS_2 single crystals. *Journal of Physics*. 1979. Vol. 12, № 12. P. 1151–1156.
6. Inoue K., Matsuda O., Murase K. Raman spectra of tetrahedral vibrations in crystalline germanium dichalcogenides, GeS_2 and GeSe_2 , in high and low temperature forms. *Solid State Communications*. 1991. Vol. 79, № 11. P. 905–910.
7. Burton L. A., Whittles T. J., Hesp D., Linhart W. M., Skelton J. M., Hou B., Webster R. F., O'Dowd G., Reece C., Cherns D., Fermin D. J., Veal T. D., Dhanak V. R., Walsh A. Electronic and optical properties of single crystal SnS_2 : an earth-abundant disulfide photocatalyst. *Journal of Materials Chemistry A*. 2016. Vol. 4. P. 1312–1318. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5TA08214E>
8. Абрикосов Н. Х. и др. Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе. М. : Наука, 1975. 219 с.
9. Mullen D. J. E., Nowacki W. Refinement of the crystal structures of realgar AsS and orpiment As_2S_3 . *Phase Transit.* 1992. Vol. 38. P. 127–220.
10. Stergiou A. C., Rentzeperis P. J. The Crystal Structure of Arsenic Selenide, As_2Se_3 . *Zeitschrift für Kristallographie*. 1985. V. 173. P. 185–191.
11. Bayliss P., Nowacki W. Refinement of the crystal structure of stibnite Sb_2S_3 . *Zeitschrift für Kristallographie*. 1972. Vol. 135, № 2. P. 308–315.
12. Kyono A., Hayakawa A., Horiki M. Selenium substitution effect on crystal structure of stibnite (Sb_2S_3). *Physics and Chemistry of Minerals*. 2015. Vol. 42, № 6. P. 475–490.

13. Lin J.-C., Sharma R. C., Chang Y. A. The Bi–S (Bismuth–Sulfur) system. *Journal of Phase Equilibria*. 1996. Vol. 17, № 2. P. 132–139. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02665790>
14. Lundegaard L. F., Makovicky E., Boffa-Ballaran T., et al. Crystal structure and cation lone electron pair activity of Bi_2S_3 between 0 and 10 GPa. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2005. Vol. 32. P. 578–584. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00269-005-0033-2>
15. Chen Y., Liu Y., Chu M., Wang L. Phase diagrams and thermodynamic descriptions for the Bi–Se and Zn–Se binary systems. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 617. P. 423–428. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.001>
16. Sosovska S. M., Yurchenko O. M., Romanyuk Y. E., Oleksyuk I. D., Parasyuk O. V. Phase diagram of the CdGa_2Se_4 – Bi_2Se_3 system and growth of CdGa_2Se_4 single crystals. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006. Vol. 417, Issues 1–2. P. 127–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.09.031>
17. Tsyun-khua L., Pashinkin A. S., Novoselova A. V. Investigation of the Ge–S system. *Dokladi Akademii nauk SSSR*. 1963. Vol. 151, № 6. P. 1335–1336.
18. Dittmar G., Schäfer H. Die Kristallstruktur von H. T.- GeSe_2 . *Acta Crystallographica. Section B*. 1975. № 31. P. 2060–2064.
19. Dittmar G., Schäfer H. Die Kristallstruktur von L. T.- GeSe_2 . *Acta Crystallographica. Section B*. 1976. Vol. 32, № 4. P. 1188–1192.
20. Gokhale A. B., Abbaschian R. The Ge–Se (germanium-selenium) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. 1990. Vol. 11, № 3. P. 257–263.
21. Popovic Z. V., Stolz H. J. Infrared and Raman spectra of germanium dichalcogenides-II: GeSe_2 . *Physica Status Solidi B – Basic Solid State Physics*. 1981. Vol. 108. P. 153.
22. Villars P. *Pearson's Handbook: Desk Edition*. Materials Park, Ohio : ASM International, 1997. Vol. 1–2. 2886 p.
23. Grzechnik A., Stolen S., Bakken E., Grande T., Mezouar M. Structural transformations in three-dimensional crystalline GeSe_2 at high pressures and high temperatures. *Journal of Solid State Chemistry*. 2000. Vol. 150. P. 121–127.
24. Karakhanova M. I., Pashinkin A. S., Novoselova A. V. O diagramme plavkosti olovo – sera. *Neorganicheskie materialy*. 1966. T. 2, № 6. S. 991–996.
25. Hazen R. M., Finger L. W. The crystal structures and compressibilities of layer minerals at high pressure. I. SnS_2 , berndtite. *Phase Transition*. 1992. Vol. 38. P. 127–220.
26. Guenter J. R., Oswald H. R. Neue polytype Form von Zinn(IV)-sulfid. *Journal of Applied Crystallography*. 1989. Vol. 22. P. 622–623.
27. Караханова М. И., Пашинкин А. С., Новоселова А. В. О диаграмме плавкости системы свинец – селен. *Известия Академии наук СССР. Неорганические материалы*. 1966. Т. 2, № 7. С. 138–141.
28. Palosz B., Salje E. Lattice parameters and spontaneous strain in AX_2 polytypes: CdI_2 , PbI_2 , SnS_2 and SnSe_2 . *Journal of Applied Crystallography*. 1989. Vol. 22. P. 622–623.
29. Хімінець О. В., Баранова Л. П., Цигика В. В., Добош М. В., Хімінець В. В. Взаємодія і процеси склоутворення в системі GeS_2 – As_2S_3 . *Журнал неорганічної хімії*. 1988. Вип. 33, № 6. С. 1541–1545.
30. Klymovych O., Ivashchenko I., Oleksyuk I., Zmiy O., Lavrynyuk Z. Quasi-ternarysystem Cu_2Se – GeSe_2 – As_2Se_3 . *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2020. Vol. 41, № 2. P. 157–163.
31. Tomashyk V. Ternary Alloys Based on IV–VI and IV–VI₂ Semiconductors. *United Kingdom: CRC Press*, 2022. 382 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003123507>
32. Березнюк О., Семенюк В., Кньовець А., Когут Ю., Піскач Л. Фізико-хімічна взаємодія в системах Ag_2S – $\{\text{As}, \text{Sb}, \text{Bi}\}_2\text{S}_3$ – GeS_2 . *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. Вип. 3. С. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-3-2>
33. Блецкан Д. И. Кристаллические и склоутворюющие халькогениды Si, Ge, Sn и сплавы на их основе: монография. Т. 1. Ужгород : Закарпаття, 2004. 292 с.
34. Dra M., Mora Aznar T. Estudio de los mecanismos de cristalización primaria y eutéctica de aleaciones del sistema GeSe_2 – Sb_2Se_3 . Bellaterra, 1998. Thesis submitted for the degree of Doctor in Physics.
35. Zmiy O. F., Gulay L. D., Ostapyuk T. A., Klymovych O. S. Interaction of the components in the Ag_2Se – SnSe_2 – As_2Se_3 system. *Chemical Metals & Alloys*. 2008. Vol. 1. P. 115–119.
36. Mamedov Sh. G. The phase equilibria of the Cu_2SnS_3 – Sb_2S_3 system. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry Series*. 2020. Vol. 18. P. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.17223/24135542/18/2>
37. Березнюк О., Смітюх О., Піскач Л. Система Cu_2S – Sb_2S_3 – SnS_2 . *Праці НТШ. Хімічні науки*. 2023. Т. LXXIII. С. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2023.73.045>

REFERENCES:

1. Messina, S., Nair, M. T. S., Nair, P. K. (2009). Solar cells with Sb_2S_3 absorber films. *Thin Solid Films*. Vol. 517. P. 2503–2507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.060>
2. Anatyshuk, L. I. (1979). Termoelementy i termoelektrycheskye ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian].
3. Srikanth, S., Suriyanarayanan, N., Prabakar, S., Balasubramanian, V., Kathirvel, D. (2011). Structural and optical properties of chemical bath deposited Sb_2S_3 thin films. *Advanced Applied Science Research*. Vol. 2, № 1. P. 95–104.
4. Kozma, A. A., Peresh, Ye. Yu., Barchii, I. Ye., Sabov, M. Yu., Haborets, N. Yi., Kun, H. V. (2014). Pro vzaimozv'язok termoelektrychnykh vlastyvostei binarnykh khalkohenediv pidhrupy arsenu z elementarny vykhidnymy komponentamy [On the relationship of thermoelectric properties of binary arsenic subgroup chalcogenides with elemental components]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriya: Khimiia – Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Chemistry Series*, (1)31, 19–24. [in Ukrainian].
5. Nikolic, P. M., Popovic, Z. V. (1979). Some optical properties of GeS_2 single crystals. *Journal of Physics*. Vol. 12, № 12. P. 1151–1156.
6. Inoue, K., Matsuda, O., Murase, K. (1991). Raman spectra of tetrahedral vibrations in crystalline germanium dichalcogenides, GeS_2 and GeSe_2 , in high and low temperature forms. *Solid State Communications*. Vol. 79, № 11. P. 905–910.
7. Burton, L. A., Whittles, T. J., Hesp, D., Linhart, W. M., Skelton, J. M., Hou, B., Webster, R. F., O'Dowd, G., Reece, C., Cherns, D., Fermin, D. J., Veal, T. D., Dhanak, V. R., Walsh, A. (2016). Electronic and optical properties of single crystal SnS_2 : an earth-abundant disulfide photocatalyst. *Journal of Materials Chemistry A*. Vol. 4. P. 1312–1318. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5TA08214E>
8. Abrikosov, N. Kh., et al. (1975). Poluprovodnikovye khal'kogenidy i splavy na ikh osnove [Semiconducting chalcogenides and alloys based on them]. Moscow : Nauka.
9. Mullen, D. J. E., Nowacki, W. (1992). Refinement of the crystal structures of realgar AsS and orpiment As_2S_3 . *Phase Transit*. Vol. 38. P. 127–220.
10. Stergiou, A. C., Rentzeperis, P. J. (1985). The Crystal Structure of Arsenic Selenide, As_2Se_3 . *Zeitschrift für Kristallographie*. V. 173. P. 185–191.
11. Bayliss, P., Nowacki, W. (1972). Refinement of the crystal structure of stibnite Sb_2S_3 . *Zeitschrift für Kristallographie*. Vol. 135, № 2. P. 308–315.
12. Kyono, A., Hayakawa, A., Horiki, M. (2015). Selenium substitution effect on crystal structure of stibnite (Sb_2S_3). *Physics and Chemistry of Minerals*. Vol. 42, № 6. P. 475–490.
13. Lin, J.-C., Sharma, R. C., Chang, Y. A. (1996). The Bi–S (Bismuth–Sulfur) system. *Journal of Phase Equilibria*. Vol. 17, № 2. P. 132–139. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02665790>
14. Lundegaard, L. F., Makovicky, E., Boffa-Ballaran, T., et al. (2005). Crystal structure and cation lone electron pair activity of Bi_2S_3 between 0 and 10 GPa. *Physics and Chemistry of Minerals*. Vol. 32. P. 578–584. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00269-005-0033-2>
15. Chen, Y., Liu, Y., Chu, M., Wang, L. (2014). Phase diagrams and thermodynamic descriptions for the Bi–Se and Zn–Se binary systems. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 617. P. 423–428. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.001>
16. Sosovska, S. M., Yurchenko, O. M., Romanyuk, Y. E., Oleksyuk, I. D., Parasyuk, O. V. (2006). Phase diagram of the $\text{CdGa}_2\text{Se}_4\text{–Bi}_2\text{Se}_3$ system and growth of CdGa_2Se_4 single crystals. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 417, Issues 1–2. P. 127–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.09.031>
17. Tsyun-khua, L., Pashinkin, A. S., Novoselova, A. V. (1963). Investigation of the Ge–S system. *Doklady Akademii nauk SSSR*. Vol. 151, № 6. P. 1335–1336.
18. Dittmar, G., Schäfer, H. (1975). Die Kristallstruktur von H.T.- GeS_2 . *Acta Crystallographica. Section B*. № 31. P. 2060–2064.
19. Dittmar, G., Schäfer, H. (1976). Die Kristallstruktur von L.T.- GeS_2 . *Acta Crystallographica. Section B*. Vol. 32, № 4. P. 1188–1192.
20. Gokhale, A. B., Abbaschian, R. (1990). The Ge–Se (germanium-selenium) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. Vol. 11, № 3. P. 257–263.
21. Popovic, Z. V., Stolz, H. J. (1981). Infrared and Raman spectra of germanium dichalcogenides-II: GeSe_2 . *Physica Status Solidi B – Basic Solid State Physics*. Vol. 108. P. 153.
22. Villars, P. (1997). *Pearson's Handbook: Desk Edition*. Materials Park, Ohio: ASM International, Vol. 1–2. 2886 p.
23. Grzechnik, A., Stolen, S., Bakken, E., Grande, T., Mezouar, M. (2000). Structural transformations in three-dimensional crystalline GeSe_2 at high pressures and high temperatures. *Journal of Solid State Chemistry*. Vol. 150. P. 121–127.

24. Karakhanova, M. I., Pashinkin, A. S., Novoselova, A. V. (1966). O diagramme plavkosti olovo – sera. *Neorganicheskie materialy*. T. 2, № 6. S. 991–996.
25. Hazen, R. M., Finger, L. W. (1992). The crystal structures and compressibilities of layer minerals at high pressure. I. SnS_2 , berndtite. *Phase Transition*. Vol. 38. P. 127–220.
26. Guenter, J. R., Oswald, H. R. (1989). Neue polytype Form von Zinn(IV)-sulfid. *Journal of Applied Crystallography*. Vol. 22. P. 622–623.
27. Karakhanova, M. I., Pashinkin, A. S., Novoselova, A. V. (1966). O diagramme plavkosti sistemy svinets – selen [On the melting diagram of the lead – selenium system]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Neorganicheskie materialy – Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Inorganic Materials*, 2(7), 138–141.
28. Palosz, B., Salje, E. (1989). Lattice parameters and spontaneous strain in AX_2 polytypes: CdI_2 , PbI_2 , SnS_2 and SnSe_2 . *Journal of Applied Crystallography*. Vol. 22. P. 622–623.
29. Khiminets, O. V., Baranova, L. P., Tsygyka, V. V., Dobosh, M. V., Khiminets, V. V. (1988). Vzaiemodiia i protsesy sklo-utvorennia v systemi $\text{GeS}_2 - \text{As}_2\text{S}_3$ [Interaction and glass formation processes in the $\text{GeS}_2 - \text{As}_2\text{S}_3$ system]. *Zhurnal neorganichnoi khimii – Journal of Inorganic Chemistry*, 33(6), 1541–1545. [in Ukrainian].
30. Klymovych, O., Ivashchenko, I., Oleksyuk, I., Zmiy, O., Lavrynyuk, Z. (2020). Quasi-ternarysystem $\text{Cu}_2\text{Se} - \text{GeSe}_2 - \text{As}_2\text{Se}_3$. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. Vol. 41, № 2. P. 157–163.
31. Tomashyk, V. (2022). Ternary Alloys Based on IV–VI and IV–VI₂ Semiconductors. *United Kingdom: CRC Press*, 382 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003123507>
32. Berezniuk, O., Semeniuk, V., Knovets, A., Kohut, Yu., & Piskach, L. (2024). Fyzyko-khimichna vzaiemodiia v systemakh $\text{Ag}_2\text{S} - \{\text{As, Sb, Bi}\}_2\text{S}_3 - \text{GeS}_2$ [Physico-chemical interaction in the systems $\text{Ag}_2\text{S} - \{\text{As, Sb, Bi}\}_2\text{S}_3 - \text{GeS}_2$]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku – Problems of Chemistry and Sustainable Development*, (3), 11–18. <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-3-2> [in Ukrainian].
33. Bletskan, D. I. (2004). Krystalichni i sklo-utvoriuiuchi khalkohenidy Si, Ge, Sn i splavy na yikh osnovi: monohrafiia. T. 1 [Crystalline and glass-forming chalcogenides of Si, Ge, Sn and their alloys: monograph. Vol. 1]. Uzhhorod: Zakarpattia. [in Ukrainian]
34. Dra, M., Mora Aznar, T. (1998). Estudio de los mecanismos de cristalización primaria y eutéctica de aleaciones del sistema $\text{GeSe}_2 - \text{Sb}_2\text{Se}_3$. Bellaterra, Thesis submitted for the degree of Doctor in Physics.
35. Zmiy, O. F., Gulay, L. D., Ostapyuk, T. A., Klymovych, O. S. (2008). Interaction of the components in the $\text{Ag}_2\text{Se} - \text{SnSe}_2 - \text{As}_2\text{Se}_3$ system. *Chemical Metals & Alloys*. Vol. 1. P. 115–119.
36. Mamedov, Sh. G. (2020). The phase equalibria of the $\text{Cu}_2\text{SnS}_3 - \text{Sb}_2\text{S}_3$ system. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry Series*. Vol. 18. P. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.17223/24135542/18/2>
37. Berezniuk, O., Smityukh, O., & Piskach, L. (2023). Systema $\text{Cu}_2\text{S} - \text{Sb}_2\text{S}_3 - \text{SnS}_2$ [System $\text{Cu}_2\text{S} - \text{Sb}_2\text{S}_3 - \text{SnS}_2$]. *Pratsi NTSh. Khimichni nauky – Proceedings of Shevchenko Scientific Society. Chemical Sciences*, LXXIII, 45–58. <https://doi.org/10.37827/ntsh.chem.2023.73.045> [in Ukrainian].

УДК 547.781 + 547.869 + 547.79

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-6>

Олександр ПРИМАЧУК

аспірант кафедри органічної та фармацевтичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Богдан ЛУКАШЕВИЧ

аспірант кафедри органічної та фармацевтичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Роман ШАНДРУК

аспірант кафедри органічної та фармацевтичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Валерій СЛИВКА

аспірант кафедри органічної та фармацевтичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Леся САЛІЄВА

кандидат хімічних наук, доцент кафедри органічної та фармацевтичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-1047-8652

Наталія СЛИВКА

доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри органічної та фармацевтичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-3811-7138

Бібліографічний опис статті: Примачук, О., Лукашевич, Б., Шандрук, Р., Сливка, В., Салієва, Л., Сливка, Н. (2025). Оцінка антиоксидантної активності ацетатів з імідазотіазиновим фрагментом. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 45–50, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-6>

ОЦІНКА АНТИОКСИДАНТНОЇ АКТИВНОСТІ АЦЕТАТІВ З ІМІДАЗОТІАЗИНОВИМ ФРАГМЕНТОМ

У даній роботі представлено результати синтезу (бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазиніл ацетатів шляхом ацилювання 3-гідрокси(бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазинів оцтовим ангідридом, а також їх подальшого дослідження щодо антиоксидантної активності.

Вперше одержані сполуки **2a–в** були протестовані на здатність до інгібування вільнорадикального DPPH (1,1-дифеніл-2-пікрілгідразилу) методом спектрофотометричного аналізу. Оцінка антиоксидантних властивостей проводилася у метанольному середовищі при концентрації 5 мМ з реєстрацією зміни оптичної густини через 60 хвилин інкубації. Такий експериментальний підхід дозволяє ефективно і швидко ідентифікувати потенційно активні сполуки, оптимізуючи при цьому витрати часу та матеріалів. Аскорбінова кислота використовувалась як референтна сполука.

За результатами скринінгових досліджень встановлено, що 6,7-дигідро-5H-імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазин-6-іл ацетат **2a**, 2,3-дифеніл-6,7-дигідро-5H-імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазин-6-іл ацетат **2б** та 3,4-дигідро-2H-бенз[4,5]імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазин-3-іл ацетат **2в** виявляють здатність до інгібування радикалів DPPH на рівні 61,2 %, 57,7 % та 56,9 % відповідно. Найвищу антиоксидантну активність продемонструвала сполука **2a**, що дозволяє розглядати її як перспективний об'єкт для подальших досліджень у напрямку розробки нових синтетичних антиоксидантів.

Структурний аналіз досліджуваних сполук засвідчив, що наявність дифенільних замісників в імідазольно-му циклі, а також конденсованого бензімідазольного ядра зумовлює зниження антиоксидантної активності

імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазиніл ацетатів. Натомість наявність незаміщеного імідазольного фрагмента корелює з підвищенням їх антирадикальної дії.

Ключові слова: (бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазиніл ацетати, інгібування DPPH-радикалів, антиоксидантна активність, показник інгібування.

Oleksandr PRYMACHUK

Postgraduate Student at the Department of Organic and Pharmaceutical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

Bohdan LUKASHEVYCH

Postgraduate Student at the Department of Organic and Pharmaceutical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

Roman SHANDRUK

Postgraduate Student at the Department of Organic and Pharmaceutical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

Valeriy SLIVKA

Postgraduate Student at the Department of Organic and Pharmaceutical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

Lesya SALIYEVA

Candidate of Chemical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Organic and Pharmaceutical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-1047-8652

Nataliia SLIVKA

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Organic and Pharmaceutical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-3811-7138

To cite this article: Prymachuk, O., Lukashevich, B., Shandruk, R., Slyvka, V. Saliyeva, L., Slyvka, N. (2025). Otsinka antyoksydantnoi aktyvnosti atsetativ z imidazotiazynovym frahmentom [Evaluation of the antioxidant activity of acetates with an imidazothiazine fragment]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 45–50, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-6>

EVALUATION OF THE ANTIOXIDANT ACTIVITY OF ACETATES WITH AN IMIDAZOTHIAZINE FRAGMENT

This work presents the results of the synthesis of (benz)imidazo[2,1-*b*][1,3]thiazinyl acetates by acylation of 3-hydroxy(benz)imidazo[2,1-*b*][1,3]thiazines with acetic anhydride and their further study for antioxidant activity.

The first obtained compounds **2a–c** were tested for their ability to inhibit the free radical DPPH (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) by spectrophotometric analysis. The antioxidant properties were assessed in methanol medium at a concentration of 5 mM, with the change in optical density recorded after 60 minutes of incubation. This experimental approach allows for efficient and rapid identification of potentially active compounds while optimizing time and materials. Ascorbic acid was used as a reference compound.

According to the results of screening studies, it was found that 6,7-dihydro-5H-imidazo[2,1-*b*][1,3]thiazin-6-yl acetate **2a**, 2,3-diphenyl-6,7-dihydro-5H-imidazo[2,1-*b*][1,3]thiazin-6-yl acetate **2b**, and 3,4-dihydro-2H-benz[4,5]imidazo[2,1-*b*][1,3]thiazin-3-yl acetate **2c** exhibit the ability to inhibit DPPH radicals at the level of 61.2 %, 57.7 %, and 56.9 %, respectively. Compound **2a** demonstrated the highest antioxidant activity, which allows us to consider it as a promising object for further research towards the development of new synthetic antioxidants.

Structural analysis of the studied compounds showed that the presence of diphenyl substituents in the imidazole ring, as well as a condensed benzimidazole core, leads to a decrease in the antioxidant activity of imidazo[2,1-*b*][1,3]thiazinyl

acetates. On the other hand, the presence of an unsubstituted imidazole fragment correlates with an increase in their antiradical activity.

Key words: (benz)imidazo[2,1-*b*][1,3]thiazinyl acetates, DPPH radical inhibition, antioxidant activity, inhibition index.

Порушення рівноваги в системі клітинного метаболізму, зокрема зсув балансу між окисненням та відновленням у бік посилення прооксидантної активності, лежить в основі виникнення багатьох патологічних станів організму. Одним із характерних проявів цього явища є підвищення інтенсивності пероксидного окиснення ліпідів – процесу, який, як відомо (Zheng Y., 2024) є універсальним механізмом ушкодження клітинних структур, особливо мембран. У відповідь на такі зміни в живому організмі запускаються адаптивні механізми, покликані знизити накопичення продуктів вільнорадикального окиснення та стабілізувати їхній рівень у межах фізіологічної норми (Pomatto L.C.D., 2018).

Зростаюча увага науковців до вивчення процесів окиснення в організмі зумовлена акумуляцією численних доказів того, що оксидативний стрес є ключовою ланкою патогенезу широкого спектра захворювань – від серцево-судинних і нейродегенеративних до онкологічних та імунних розладів. Особливе занепокоєння викликає вплив зовнішніх чинників, таких як токсичні речовини, важкі метали, пестициди та інші ксенобіотики, які здатні провокувати активне утворення реактивних форм кисню (РФК), таких як супероксид-аніон, гідроксильний радикал та пероксид водню. Ці молекули, володіючи високою хімічною реактивністю, вступають у взаємодію з ліпідами, білками, нуклеїновими кислотами, спричиняючи структурні та функціональні порушення в клітинах. Зокрема, пошкодження ДНК може призводити до мутацій і запуску апоптозу, а окиснення білків – до втрати їхньої біологічної активності або агрегації (Pooja G., 2025).

Антиоксидантна система організму, що включає як ферментативні (супероксиддисмутаза, каталаза, глутатіонпероксидаза), так і неферментативні компоненти (вітаміни Е, С, каротиноїди, глутатіон), виконує ключову роль у знешкодженні РФК. Проте за умов тривалого або інтенсивного впливу оксидативного стресу її захисна здатність може виснажуватись, що сприяє прогресуванню різноманітних патологічних станів – від запальних процесів

і нейродегенеративних захворювань до атеросклерозу та онкопатологій (Jomova K., 2024).

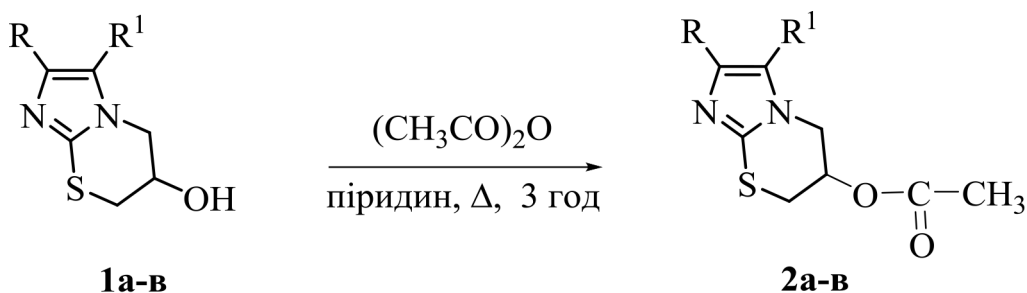
У зв'язку з цим пошук і створення нових ефективних антиоксидантів, здатних запобігати або зменшувати шкідливий вплив РФК, є важливим напрямом сучасної фармацевтичної та біомедичної хімії. Серед перспективних об'єктів дослідження особливий інтерес викликають конденсовані гетероциклічні сполуки, які мають потенціал до ефективної нейтралізації вільних радикалів і захисту клітин від оксидативного пошкодження (Cavar S., 2009; Torres R., 2006; Rodriguez S.A., 2011; Mihailović N., 2017; Perveen S., 2021). Зокрема, сполуки з імідазотіазиновим каркасом, завдяки своїй конденсованій азотовмісній структурі, здатні вибірково взаємодіяти з біологічними мішенями, що визначає їхню перспективність як основи для створення нових фармакологічних засобів з антиоксидантною дією (Slyvka N. Yu., 2022, 205–211; Slyvka N. Yu., 2022, 82).

Саме тому видалось обґрунтованим провести оцінку антиоксидантної активності вперше синтезованих молекул, які б містили у своїй структурі фармакофорний імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазиновий цикл.

Для реалізації поставленого завдання, як модельні об'єкти дослідження, були обрані (бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазиніл ацетати **2a–в**. Запропонований підхід до конструювання таких систем ґрунтувався на використанні в ролі ключових субстратів 3-гідрокси(бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазинів **1a–в**, отриманих із (бензо)імідазолінтіонів модифікацією раніше описаних методів (Slyvka N. Yu., 2023).

Встановлено, що 3-гідроксиімідазо[2,1-*b*][1,3]тіазини **1a, б** та їх бензоаналог **1в** селективно реагують із оцтовим ангідридом в сухому піридині при кип'ятінні впродовж 3 год із утворенням (бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазиніл ацетатів **2a, б** та їх бензоанельованого похідного **2в** із виходами 42–57 %.

Будова синтезованих сполук підтверджена результатами вимірів ^1H NMR, ^{13}C NMR та LC-MS спектрів, які наведені в експериментальній частині. Зокрема, для всіх ацетатів **2a–в** показовим є поява сигналу протонів CH_3 -групи



2a $\text{R} = \text{R}^1 = \text{H}$; **6** $\text{R} = \text{R}^1 = \text{Ph}$; **в** $\text{RR}^1 = (\text{CH}=\text{CH})_2$.

Схема 1. Синтез (бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазиніл ацетатів **2a–в**

ацетильного фрагменту, які легко ідентифікуються в області 2.11 та 2.12 м.ч.

Синтезовані (бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазиніл ацетати **2a–в** було протестовано на здатність інгібувати вільні радикали 1,1-дифеніл-2-пікрилгідразилу (DPPH) відповідно до методики (Brand-Williams W., 1995). Експериментальні дослідження включали оцінку антиоксидантної активності сполук **2a–в** у метанольному розчині за концентрації 5 мМ шляхом вимірювання змін оптичної густини після 60 хвилин інкубації. Такий підхід дозволяє оперативно виявити перспективні зразки, оптимізуючи витрати часу та матеріалів.

Як стандарт при дослідженні антиоксидантної активності використовували аскорбінову кислоту. Результати скринінгу активності сполук (бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазиніл ацетатів

2a–в, представлені на рис. 1, показали інгібування радикалів DPPH у межах 56,9–61,2 %. Особливо варто відзначити 6,7-дигідро-5*H*-імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазин-6-іл ацетат **2a**, який продемонстрував найвищу активність інгібування та є перспективним кандидатом для подальших фармакологічних досліджень з метою розробки нових синтетичних антиоксидантів.

Таким чином, ацилювання 3-гідрокси(бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазинів оцтовим ангідридом дозволило одержати нові похідні – (бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазиніл ацетати **2a–в**. Проведене первинне дослідження їх антиоксидантної активності засвідчило здатність інгібувати DPPH-радикали на рівні 56,9–61,2 %. Отримані результати вказують на перспективність цих сполук як об'єктів для подальшого вивчення з метою розробки потенційних синтетичних антиоксидантів.

Експериментальна хімічна частина

Сpektри ЯМР ^1H і ^{13}C записані на спектрометрі Varian VXR-400 (400 і 126 МГц, відповідно) в імпульсному Фур'є-режимі в CDCl_3 , внутрішній стандарт TMC. Мас-спектри записані на приладі Agilent LC/MSD SL, колонка Zorbax SB-C18, 4,6×15 мм, 1,8 мкм (PN 82(c)75-932), розчинник DMSO- d_6 , іонізація електророзпиленням за атмосферного тиску. Елементний аналіз виконаний на приладі PerkinElmer CH Analyzer серії 2400 в аналітичній лабораторії Інституту органічної хімії НАН України. Температури топлення усіх синтезованих речовин визначали на приладі з капілярною трубкою і не коригували.

Синтез (бенз)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазиніл ацетатів 2. До розчину 1 ммоль відповідного 3-гідроксиімідазо[2,1-*b*][1,3]тіазину **1a–в** в 5 мл сухого піридину додавали 1 мл оцтового

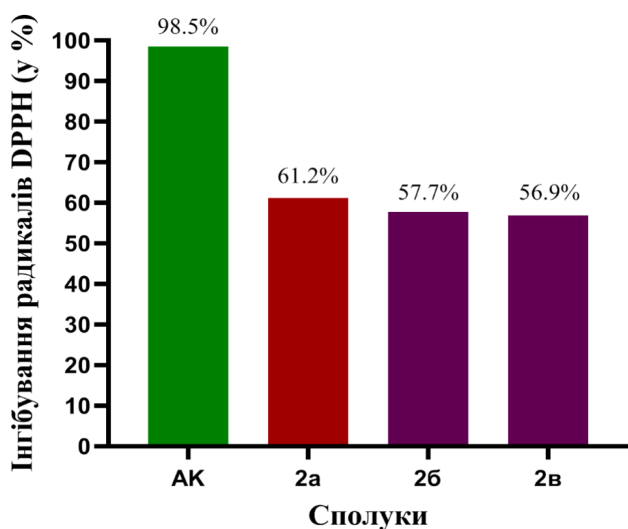


Рис. 1. Інгібування радикалів DPPH ацетатами **2a–в** у концентрації 5 мМ. Як стандарт використовували аскорбінову кислоту (зелений колір). Найвищу антиоксидантну активність має сполука **2a** (червоний колір)

ангідриду. Суміш кип'ятили протягом 3 год, охолоджували, виливали на лід, осад, що утворився, відфільтровували. Одержані продукти очищали за допомогою колонкової хроматографії (елюент хлороформ-метанол 50:1).

6,7-Дигідро-5H-імідазо[2,1-b][1,3]тіазин-6-іл ацетат 2a. Вихід: 57 %, т. топл. 71–72 °С. ЯМР ¹H спектр, CDCl₃, δ, м.ч. (КССВ, J, Гц): 2.11 с (3H, Me), 3.27–3.35 м (2H, CH₂), 4.09–4.14 м (1H, CH₂), 4.19–4.23 м (1H, CH₂), 5.43–5.48 м (1H, CH), 6.88 с (1H, CH_{імідаз.}), 7.03 с (1H, CH_{імідаз.}). ЯМР ¹³C спектр, CDCl₃, δ, м.ч.: 20.4 (Me), 28.9 (C⁷), 47.9 (C⁵), 63.8 (C⁶), 120.1 (C³), 128.5 (C²), 136.1 (C^{8a}), 169.6 (C=O). Мас-спектр, m/z: 199 [M + H]⁺. Знайдено, %: C, 48.47; H, 5.08; N, 14.13. C₈H₁₀N₂O₂S. Вираховано, %: C, 47.69; H, 5.05; N, 14.28.

2,3-Дифеніл-6,7-дигідро-5H-імідазо[2,1-b][1,3]тіазин-6-іл ацетат 2b. Вихід: 42 %, т. топл. 108–109 °С. ЯМР ¹H спектр, CDCl₃, δ, м.ч. (КССВ, J, Гц): 2.11 с (3H, Me), 3.31–3.40 м (2H, CH₂), 4.15–4.22 м (2H, CH₂), 5.52–5.58 м (1H, CH), 7.47–7.51 м (6H, H_{аром.}), 7.77–7.81 м (4H, H_{аром.}). ЯМР ¹³C спектр, CDCl₃, δ, м.ч.: 20.6 (Me), 29.1 (C⁷), 48.0 (C⁵), 63.8 (C⁶), 126.7, 126.9, 128.3, 129.2, 129.3, 129.6, 129.9, 130.9 (C_{аром.}), 133.8 (C³), 136.3 (C²), 136.5 (C^{8a}), 169.8 (C=O). Мас-спектр, m/z: 351 [M + H]⁺. Знайдено, %: C, 68.55; H, 5.18; N, 7.99. C₂₀H₁₈N₂O₂S. Вираховано, %: C, 68.78; H, 5.14; N, 7.83.

3,4-Дигідро-2H-бенз[4,5]імідазо[2,1-b][1,3]тіазин-3-іл ацетат 2в. Вихід: 53 %, т. топл. 125–127 °С. ЯМР ¹H спектр, CDCl₃, δ, м.ч. (КССВ, J, Гц): 2.12 с (3H, Me), 3.37–3.46 м (2H, CH₂), 4.29–4.37 м (2H, CH₂), 5.58–5.63 м

(1H, CH), 7.21–7.28 м (3H, H_{аром.}), 7.65 д (1H, ³J = 8.0, H_{аром.}). ЯМР ¹³C спектр, CDCl₃, δ, м.ч.: 20.9 (Me), 28.9 (C²), 46.2 (C⁴), 63.4 (C³), 107.8 (C⁶), 118.3 (C⁹), 121.7 (C⁷), 122.7 (C⁸), 135.6 (C^{5a}), 143.1 (C^{9a}), 145.6 (C^{10a}), 170.1 (C=O). Мас-спектр, m/z: 249 [M + H]⁺. Знайдено, %: C, 58.05; H, 4.87; N, 11.28. C₁₂H₁₂N₂O₂S. Вираховано, %: C, 58.26; H, 4.83; N, 11.42.

Дослідження антиоксидантної активності (аналіз DPPH). Для оцінки антиоксидантної активності синтезованих (бенз)імідазо[2,1-b][1,3]тіазиніл ацетатів **2a–в** застосовували метод визначення здатності до інгібування DPPH-радикалів відповідно до описаної методики (Brand-Williams W., 1995). До метанольних розчинів досліджуваних сполук та аскорбінової кислоти (використаної як еталон) додавали по 1 мл розчину DPPH (8 мг/100 мл), після чого суміші інкубували протягом 1 години при кімнатній температурі у темряві. Оптичну густину вимірювали при довжині хвилі 517 нм відносно контрольного зразка за допомогою спектрофотометра UV-1800 (Shimadzu, Японія). Кожен зразок досліджували в трьох повтореннях. Відсоток інгібування розраховували відносно холостого зразка за формулою:

$$I \% = \frac{(A_{blank} - (A_{sample+DPPH} - A_{sample}))}{A_{blank}} \cdot 100 \%,$$

де A_{blank} – абсорбція контрольної реакції (охоплює всі реагенти, крім досліджуваних сполук); A_{sample + DPPH} – абсорбція досліджуваних сполук після 60 хв інкубації з розчином DPPH; A_{sample} – абсорбція досліджуваних сполук без розчину DPPH.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Zheng, Y., Sun, J., Luo, Z. et al. Emerging mechanisms of lipid peroxidation in regulated cell death and its physiological implications. *Cell Death Dis.* 2024.15. 859.
2. Pomatto, L. C. D., Davies, K. J. A. Adaptive homeostasis and the free radical theory of ageing. *Free Radic Biol Med.* 2018. 124. 420–430.
3. Pooja, G., Shweta, S., Patel, P. Oxidative stress and free radicals in disease pathogenesis: a review. *Discov Med.* 2025. 2. 104.
4. Jomova, K., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H. et al. Several lines of antioxidant defense against oxidative stress: antioxidant enzymes, nanomaterials with multiple enzyme-mimicking activities, and low-molecular-weight antioxidants. *Arch Toxicol.* 2024. 98. 1323–1367.
5. Cavar, S., Kovač, F., Maksimović, M. Synthesis and antioxidant activity of selected 4-methylcoumarins. *Food Chem.* 2009. 117. 135–142.
6. Torres, R., Faini, F., Modak, B., Urbina, F., et. al. Antioxidant activity of coumarins and flavonoids from the resinous exudate of *Haplopappus multifolius*. *Phytochemistry.* 2006. 67. 984–987.
7. Rodriguez, S. A., Nazareno, M. A., Baumgartner, M. T. Effect of different C3-aryl substituents on the antioxidant activity of 4-hydroxycoumarin derivatives. *Bioorg. Med. Chem.* 2011. 6233–6238.

8. Mihailović, N., Marković, V., Matić, I. Z., Stanisavljević, N. S., Jovanović, Ž. S., Trifunović, S., Joksović, L. Synthesis and antioxidant activity of 1,3,4-oxadiazoles and their diacylhydrazine precursors derived from phenolic acids. *RSC Advances*. 2017. 7(14). 8550–8560.
9. Perveen S., Saad S. M., Khan K. M., Choudhary M. I. Antioxidant and ROS Inhibitory Activities of Heterocyclic 2-Aryl-4(3H)-quinazolinone Derivatives. *Letters in Drug Design & Discovery*. 2021. 8(18). 806–815.
10. Slyvka, N. Yu., Holota, S. M., Saliyeva, L. M., Kadykalo, E. M. Kolishetska, M. A., Vovk M. V. Evaluation of antioxidant activity of derivatives with 6,7-dihydro-5H-imidazo[2,1-b][1,3]thiazine scaffold. *Biopolymers and Cell*. 2022. 38. 3. 205–211.
11. Slyvka, N., Holota, S., Saliyeva, L., Vovk M. Synthetic Approach to Diversified Imidazo[2,1-b][1,3]thiazines and Its Evaluation as Non-Steroidal Anti-Inflammatory Agents. *Chemistry Proceedings*. 2022. 8. 1. 82.
12. Slyvka, N., Saliyeva, L., Holota, S., Tkachuk, V., Vaskevych, A., Vaskevych, R., Vovk M. Convenient Synthesis of 4-pyridinyloxy-Modified imidazo[2,1-b][1,3]thiazines as Potential Anti-inflammatory Agents. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2023. 13(2). 183.
13. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*. 1995. 28(1). 25–30.

REFERENCES:

1. Zheng, Y., Sun, J., Luo, Z. et al. (2024). Emerging mechanisms of lipid peroxidation in regulated cell death and its physiological implications. *Cell Death Dis*. 15. 859.
2. Pomatto, L. C. D., Davies, K. J. A. (2018). Adaptive homeostasis and the free radical theory of ageing. *Free Radic Biol Med*. 124. 420–430.
3. Pooja, G., Shweta, S. & Patel, P. (2025). Oxidative stress and free radicals in disease pathogenesis: a review. *Discov Med*. 2. 104.
4. Jomova, K., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H. et al. (2024). Several lines of antioxidant defense against oxidative stress: antioxidant enzymes, nanomaterials with multiple enzyme-mimicking activities, and low-molecular-weight antioxidants. *Arch Toxicol*. 98. 1323–1367.
5. Cavar, S., Kovač, F., Maksimović, M. (2009). Synthesis and antioxidant activity of selected 4-methylcoumarins. *Food Chem*. 117. 135–142.
6. Torres, R., Faini, F., Modak, B., Urbina, F., et. al. (2006). Antioxidant activity of coumarins and flavonoids from the resinous exudate of *Haplopappus multifolius*. *Phytochemistry*. 67. 984–987.
7. Rodriguez, S. A., Nazareno, M. A., Baumgartner, M. T. (2011). Effect of different C3-aryl substituents on the antioxidant activity of 4-hydroxycoumarin derivatives. *Bioorg. Med. Chem*. 6233–6238.
8. Mihailović, N., Marković, V., Matić, I. Z., Stanisavljević, N. S., Jovanović, Ž. S., Trifunović, S., Joksović, L. (2017). Synthesis and antioxidant activity of 1,3,4-oxadiazoles and their diacylhydrazine precursors derived from phenolic acids. *RSC Advances*. 7(14). 8550–8560.
9. Perveen S., Saad S. M., Khan K. M., Choudhary M.I. (2021). Antioxidant and ROS Inhibitory Activities of Heterocyclic 2-Aryl-4(3H)-quinazolinone Derivatives. *Letters in Drug Design & Discovery*. 8(18). 806–815.
10. Slyvka, N. Yu., Holota, S. M., Saliyeva, L. M., Kadykalo, E. M. Kolishetska, M. A., Vovk M. V. (2022). Evaluation of antioxidant activity of derivatives with 6,7-dihydro-5H-imidazo[2,1-b][1,3]thiazine scaffold. *Biopolymers and Cell*. 38. 3. 205–211.
11. Slyvka, N., Holota, S., Saliyeva, L., Vovk M. (2022). Synthetic Approach to Diversified Imidazo[2,1-b][1,3]thiazines and Its Evaluation as Non-Steroidal Anti-Inflammatory Agents. *Chemistry Proceedings*. 8. 1. 82.
12. Slyvka, N., Saliyeva, L., Holota, S., Tkachuk, V., Vaskevych, A., Vaskevych, R., Vovk M. (2023). Convenient Synthesis of 4-pyridinyloxy-Modified imidazo[2,1-b][1,3]thiazines as Potential Anti-inflammatory Agents. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 13(2). 183.
13. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*. 28(1). 25–30.

УДК 541.183

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-7>

Наталія СТЕЦЕНКО

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри технології оздоровчих продуктів, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0000-0001-6710-024X

Наталія БУБЛІЄНКО

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0000-0003-0299-4646

Scopus Author ID: 55683913900

Оксана САЛАВОР

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0000-0002-5784-3127

Scopus Author ID: 57219904957

Оксана НИЧИК

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0000-0002-4679-8607

Scopus Author ID: 57219905601

Ольга ТОГАЧИНСЬКА

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0000-0002-6672-6539

Бібліографічний опис статті: Стеценко, Н., Бублієнко, Н., Салавор, О., Ничик, О., Тогачинська, О. (2025). Адсорбційне очищення напівпродуктів цукрового виробництва палигорськітом та глауконітом. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 51–56, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-7>

АДСОРБЦІЙНЕ ОЧИЩЕННЯ НАПІВПРОДУКТІВ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА ПАЛИГОРСЬКІТОМ ТА ГЛАУКОНІТОМ

Метою роботи є визначення адсорбційних властивостей природних дисперсних мінералів України палигорськіту та глауконіту у процесах видалення барвних речовин при виробництві цукру.

Досліджували ефективність адсорбційного очищення технологічних розчинів бурякоцукрового виробництва та модельних розчинів меляси з різною концентрацією барвних речовин при їх взаємодії з природними дисперсними мінералами України, а саме палигорськітом та глауконітом. Також визначали адсорбційні характеристики карбонату кальцію, який традиційно використовують для очищення напівпродуктів цукрового виробництва. Підготовку природних дисперсних мінералів здійснювали шляхом відмучування їх водних суспензій концентрацією 5 %. Відмиті зразки адсорбентів підсушували та встановлювали їх вологість. Адсорбційну рівновагу вивчали у діапазоні температур 20...80 °С. Значення вихідних та рівноважних концентрацій барвних речовин визначали спектрофотометричним методом. Ефективність видалення барвних речовин оцінювали за значеннями питомої адсорбції барвників та ефектом знебарвлення розчинів.

Встановлено, що ізотерми адсорбції барвних речовин природними дисперсними мінералами описуються рівнянням мономолекулярної адсорбції Ленгмюра. Силу сорбційної взаємодії оцінювали за значенням стандартного зменшення вільної енергії сорбції. Найкращі характеристики притаманні палигорськіту, децю гіршими є показники глауконіту сепарованого, глауконіту природного та карбонату кальцію. Було встановлено, що при підвищен-

ні температури спостерігається зменшення кількості адсорбованих барвних речовин, що вказує на переважно фізичний характер адсорбції. На підставі аналізу температурних залежностей були встановлені термодинамічні параметри процесів очищення. Вільна енергія Гіббса мало залежить від температури, а зміна ентропії має від'ємні значення, що вказує на упорядкування у системі під дією поля адсорбентів. Встановлено, що ефективність вилучення барвних речовин палігорськітом та глауконітом залежить від pH середовища і децю зменшується при зростанні лужності.

Ключові слова: адсорбція, природні дисперсні мінерали, барвні речовини, адсорбційне очищення, харчова промисловість, навколишнє середовище.

Natalia STETSENKO

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Health Products Technology, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601
ORCID: 0000-0001-6710-024X

Natalia BUBLIENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Eco-Management, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601
ORCID: 0000-0003-0299-4646
Scopus Author ID: 55683913900

Oksana SALAVOR

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Eco-Management, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601
ORCID: 0000-0002-5784-3127
Scopus Author ID: 57219904957

Oksana NYCHYK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Eco-Management, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601
ORCID: 0000-0002-4679-8607
Scopus Author ID: 57219905601

Olga TOGACHYNSKA

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Eco-Management, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601
ORCID: 0000-0002-6672-6539

To cite this article: Stetsenko, N., Bublikyenko, N., Salavor, O., Nychyk, O., Togachynska, O. (2025). Adsorbtsiine ochyshchennia napivproduktiv tsukrovoho vyrobnytstva palyhorskitom ta hlaukonitom [Adsorption purification of sugar production intermediates with palygorskite and glauconite]. *Problems of chemistry and sustainable development*, 2, 51–56, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-7>

ADSORPTION PURIFICATION OF SUGAR PRODUCTION INTERMEDIATES WITH PLYGORSKITE AND GLAUCONITE

The aim of the work is to determine the adsorption properties of natural dispersed minerals of Ukraine, palygorskite and glauconite, in the processes of removing coloring substances in sugar production.

The efficiency of adsorption purification of technological solutions of beet sugar production, namely juice II saturation and model molasses solutions with different concentrations of coloring substances in their interaction with natural dispersed minerals of Ukraine, namely palygorskite and glauconite, was studied. The adsorption characteristics of calcium carbonate, which is traditionally used for the purification of intermediate products of sugar production, were also determined. The preparation of natural dispersed minerals was carried out by macerating their aqueous suspensions with a concentration of 5 %. The washed samples of adsorbents were dried and their humidity was determined. The adsorption equilibrium was studied in the temperature range of 20...80 °C. The values of the initial and equilibrium concentrations of

coloring substances were determined by spectrophotometric method. The efficiency of dye removal was estimated by the values of specific adsorption of dyes and the decolorization effect of solutions.

It was established that the adsorption isotherms of dyes by natural dispersed minerals are described by the Langmuir equation of monomolecular adsorption. The strength of the sorption interaction was estimated by the value of the standard decrease in the free energy of sorption. The best characteristics are inherent in palygorskite, the indicators of separated glauconite, calcium carbonate and natural glauconite are somewhat worse. It was found that with increasing temperature, a decrease in the amount of adsorbed dyes is observed, which indicates a predominantly physical nature of adsorption. Based on the analysis of temperature dependences, the thermodynamic parameters of the purification processes were established. The Gibbs free energy depends little on temperature, and the change in entropy had negative values, which indicates ordering in the system under the action of the adsorbent field. It has been established that the efficiency of extracting dyes by palygorskite and glauconite depends on the pH of the medium and decreases slightly with increasing alkalinity.

Key words: adsorption, natural dispersed minerals, dyes, adsorption purification, food industry, environment.

Актуальність проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Природні глинисті мінерали тривалий час вивчаються як сорбенти для очищення питних, технологічних та стічних вод (Kang et al, 2022), а також як ефективні біоіндикатори (Gonzalez & Pokrovsky, 2014), що є чутливими до екологічної чистоти літосфери, гідросфери та атмосфери. Важливими перевагами використання природних мінеральних сорбентів є невисока вартість, доступність та поширеність на території України. Зокрема, на балансі Державного комітету запасів України знаходиться і розробляється 5 родовищ глинистих природних мінералів із загальним запасом понад 100 млн. т (Фіалковська, 2021). Серед них найбільш відомим є Черкаське родовище (104,7 млн. т.), а також Горбське (6,8 млн. т), Кунцевське (0,55 млн. т), Пиживське (0,113 млн. т) та Бережанське (0,426 млн. т).

Природні дисперсні мінерали належать до групи шаруватих алюмосилікатів, які складають близько 75 % осадової частини земної кори (Фролова & Шунькін, 2021). Вони володіють низкою унікальних властивостей, таких як термостійкість, розвинена поверхня, здатність до іонного обміну, наявність поверхневих активних центрів різної природи, мікропоровата структура, хороші фільтраційні властивості. Завдяки таким характеристикам вони знаходять широке застосування у харчових технологіях для відокремлення сполук різної природи, очищення соків (Матко, Костенко, Мельник & Марценюк, 2008), спирту та водно-спиртових розчинів (Мельник, Манк & Марцін, 2004), рослинних олій (Фіалковська, 2021) та інших середовищ.

Процес адсорбції має велике практичне значення у цукровій галузі. Якість білого кристалічного цукру, його чистота та забарвленість

суттєво залежать від ефективності адсорбційного видалення барвних речовин та інших нецукрів. Тому актуальним завданням є вивчення перспектив застосування природних дисперсних мінералів України у технології цукру.

Метою досліджень є визначення адсорбційних властивостей природних дисперсних мінералів України палигорськіту та глауконіту у процесах видалення барвних речовин при виробництві цукру.

Виклад основного матеріалу дослідження. У роботі досліджували ефективність адсорбційного очищення технологічних розчинів буряко-цукрового виробництва та модельних розчинів меляси з різною концентрацією барвних речовин при їх взаємодії з природними дисперсними мінералами України, а саме палигорськітом та глауконітом. Для порівняння визначали адсорбційні характеристики карбонату кальцію, який традиційно використовують для очищення напівпродуктів цукрового виробництва. Підготовку природних дисперсних мінералів здійснювали шляхом відмучування їх водних суспензій концентрацією 5 %. Відмиті зразки адсорбентів підсушували та встановлювали їх вологість. Адсорбційну рівновагу вивчали у діапазоні температур 20...80 °С. Значення вихідних та рівноважних концентрацій барвних речовин визначали спектрофотометричним методом. Ефективність видалення барвних речовин оцінювали за значеннями питомої адсорбції барвників та ефектом знебарвлення розчинів.

Ізотерми адсорбції барвних речовин природними дисперсними мінералами та карбонатом кальцію представлені на рис. 1. Оскільки вони представляють собою криві, які є опуклими стосовно вісі рівноважних концентрацій, можна зробити висновок про високу спорідненість

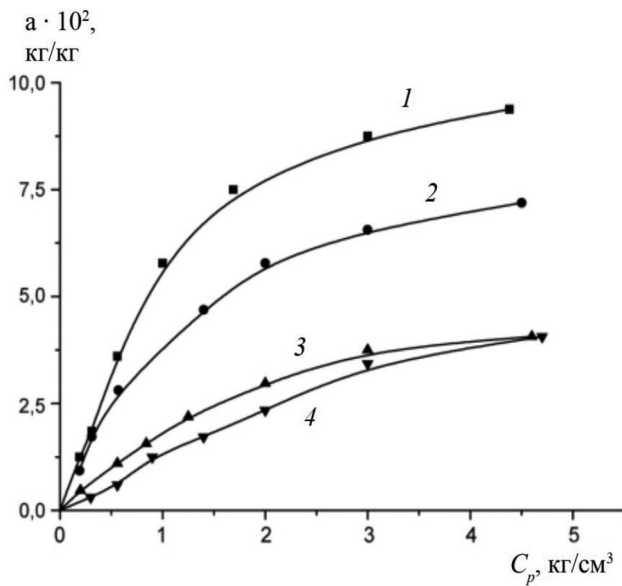


Рис. 1. Ізотерми адсорбції барвних речовин цукрового виробництва природними дисперсними мінералами: 1 – палигорськіт, 2 – глауконіт сепарований, 3 – глауконіт природний, 4 – карбонат кальцію

барвних речовин до сорбентів та можливість їх ефективного видалення (Kalam, Abu-Khamsin & Patil, 2021). Встановлено, що ізотерми адсорбції барвних речовин природними дисперсними мінералами описуються рівнянням мономолекулярної адсорбції Ленгмюра (1):

$$\frac{C_p}{a} = \frac{1}{a_\infty \cdot b} + \frac{1}{a_\infty} \cdot C, \quad (1)$$

де C та C_p – концентрація барвних речовин у розчині та їх рівноважна концентрація відповідно, $\text{кг}/\text{м}^3$; b – параметр, що описує адсорбційний процес, $\text{м}^3/\text{кг}$; a – кількість адсорбованих барвних речовин, $\text{кг}/\text{кг}$; a_∞ – максимальна кількість барвних речовин, що здатні поглинутися до певного часу, $\text{кг}/\text{кг}$.

Значення параметрів сорбційної рівноваги a_∞ та b , які були розраховані за допомогою методу найменших квадратів, представлені у табл. 1.

Силу сорбційної взаємодії оцінювали за значенням стандартного зменшення вільної енергії сорбції $-\Delta F$ (Tran et al, 2021), яку розраховували за рівнянням (2). Отримані результати наведені у табл. 1.

$$-\Delta F = RT \cdot \ln K, \quad (2)$$

де K – константа сорбційної рівноваги, що визначалася за рівнянням (3):

$$K = b \cdot a_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (3)$$

де $a_{\text{H}_2\text{O}}$ – активність розчинника у воді.

Для розбавлених розчинів мольна доля розчинника (води) дорівнює 1, тоді й коефіцієнт активності розчинника буде дорівнювати 1 (Gonella et al, 2021). У такому випадку значення $a_{\text{H}_2\text{O}}$ можна замінити на концентрацію води, яка дорівнює 55,55 моль/л.

Встановлено, що найбільше значення a_∞ характерне для палигорськіту, що можна пояснити будовою мінералу як представника шарувато-ланцюгових мінералів. Для них адсорбційні властивості визначаються типом пористості, а саме наявністю як первинних пор у вигляді цеолітних каналів у структурі, так і вторинної пористості, яка утворюється за рахунок агрегації частинок дисперсного мінералу у пористий простір пачок. Глауконіт має лише зовнішню адсорбційну поверхню, а його пористість зумовлена лише щільностями, які утворюються між частинками, що контактують. Тому його адсорбційна здатність менша, ніж у палигорськіту. Для всіх сорбентів значення стандартного зменшення вільної енергії сорбції знаходяться у межах $-13 \dots -14$ кДж/кг. Значення ефекту очищення підтверджують, що найбільш ефективно видалення барвних речовин відбувається при використанні палигорськіту, дещо гірше – при застосуванні сепарованого, природного глауконіту та карбонату кальцію.

Було досліджено температурну залежність адсорбційного видалення розчинених барвних речовин палигорськітом та глауконітом

Таблиця 1

Параметри адсорбції барвних речовин природними дисперсними мінералами та карбонатом кальцію

Адсорбент	a_∞ , $\text{кг}/\text{кг}$	b , $\text{м}^3/\text{кг}$	$-\Delta F \times 10^3$, $\text{кДж}/\text{кг}$	Ефект знебарвлення, %
Палигорськіт	0,151	320,9	14,06	48,5
Глауконіт сепарований	0,120	246,7	13,52	38,2
Глауконіт природний	0,080	208,4	13,01	36,1
Карбонат кальцію	0,065	227,5	13,22	34,2

у діапазоні температур від 293 до 373 К та встановлено, що з підвищенням температури спостерігається зменшення кількості адсорбованих барвних речовини, що вказує на переважно фізичний характер адсорбції. При визначенні термодинамічних характеристик процесу використовували рівняння Гіббса–Гельмгольца (4):

$$\Delta G^0 = -Q + T \cdot \Delta S^0, \quad (4)$$

де ΔG^0 – стандартне зменшення вільної енергії адсорбції, кДж/кг; Q – теплота адсорбції, кДж /кг; T – температура, К; ΔS^0 – зміна ентропії, кДж/(кг · К).

Ізостеричні теплоти адсорбції визначали за рівнянням Клаузіуса–Клапейрона (5):

$$Q = R \left[\frac{\partial(\ln C)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \right]_a. \quad (5)$$

Зміну ентропії адсорбції розраховували за рівнянням (6):

$$\Delta S^0 = -Q^0/T + R \cdot \ln K. \quad (6)$$

Результати розрахунків представлені у табл. 2.

Отримані дані свідчать, що значення вільної енергії Гіббса не значно залежить від температури. Зміна ентропії адсорбції в усіх випадках

має від'ємне значення, що вказує на часткове упорядкування в адсорбованій фазі під дією поля адсорбенту.

Оскільки в технології цукру видалення барвних речовин відбувається у лужному середовищі, було досліджено вплив рН на ефективність вилучення барвних речовин палигорськітом та глауконітом, результати якого представлені у табл. 3.

При підвищенні лужності розчинів ефективність видалення барвних речовин цукрового виробництва зменшується. Це можна пояснити значенням електрокінетичного потенціалу барвних речовин, який набуває найбільших значень при рН понад 9 одиниць (Оляньська & Цирульнікова, 2016). За таких умов барвні речовини мають найбільшу стійкість, що негативно впливає на їх адсорбційне видалення природними сорбентами.

Висновки і перспективи подальших досліджень. При проведенні досліджень було встановлено, що палигорськіт та глауконіт є ефективними адсорбентами для видалення барвних речовин із напівпродуктів цукрового виробництва. Адсорбція переважно має фізичний характер та описується рівнянням Ленгмюра. Підвищення температури та висока

Таблиця 2

Термодинамічні параметри адсорбції барвних речовин цукрового виробництва палигорськітом та глауконітом

Адсорбент	Температура, К	$-\Delta G^0$, кДж/кг	$-\Delta S^0$, кДж/(кг · К)	Q , кДж /кг
Палигорськіт	293	6,34	0,05	8,35
	353	8,30	0,05	
	373	9,30	0,05	
Глауконіт сепарований	293	4,03	0,04	7,84
	353	5,63	0,04	
	373	6,28	0,04	
Глауконіт природний	293	3,88	0,04	7,69
	353	5,48	0,04	
	373	6,28	0,04	

Таблиця 3

Вплив рН середовища на питому адсорбцію та ефект знебарвлення розчинів

Адсорбент	рН 20	Питома адсорбція, $a \cdot 10^2$, кг/кг	Ефект знебарвлення, %
Палигорськіт	6,5	1,19	48,5
	9,0	1,09	39,5
	11,2	0,99	32,3
Глауконіт сепарований	6,5	0,99	38,2
	9,0	0,95	32,0
	11,2	0,85	27,7
Глауконіт природний	6,5	0,71	36,1
	9,0	0,69	22,6
	11,2	0,60	19,4

лужність середовища негативно впливають на кількість вилучених барвних речовин, що потрібно враховувати при виборі місця введення сорбентів у технологічному процесі виробництва цукру.

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення можливості застосування природних дисперсних мінералів України для очищення стічних вод цукрових заводів, що є важливим завданням захисту навколишнього середовища.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Kang N., Zhou W., Qi Z., Li Y., Wang Z., Li Q., Lv K. Recent progress of natural mineral materials in environmental remediation. *Catalysts*. 2022. 12(9). P. 996.
2. Gonzalez A. G., Pokrovsky O. S. Metal adsorption on mosses: Toward a universal absorption model. *J. Coll. Interface Sci.* 2014. 415. P. 169–178.
3. Фіалковська Л. В. Ефективні способи очищення соняшникової олії від домішок. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. 2021. 11(2). С. 299–309.
4. Фролова Л. А., Шунькін І. С. Характеристика глинистих порід Полозького родовища. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2021. (3). С. 116–123.
5. Матко С. В., Костенко Є. Є., Мельник Л. М., Марценюк О. М. Сорбенти різних типів. *Харчова і переробна промисловість*. 2008. (8–9). С. 16–17.
6. Мельник Л. М., Манк В. В., Марцін І. І. Ефективність дії природних дисперсних мінералів в очищенні водно-спиртових розчинів. *Наукові праці НУХТ*. 2004. (15). С. 23–25.
7. Kalam S., Abu-Khamsin S. A., Kamal M. S., Patil S. Surfactant adsorption isotherms: A review. *ACS omega*. 2021. 6(48). P. 32342–32348.
8. Tran H. N., Lima E. C., Juang R. S., Bollinger J. C., Chao H. P. Thermodynamic parameters of liquid–phase adsorption process calculated from different equilibrium constants related to adsorption isotherms: A comparison study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. 9(6). P. 106674.
9. Gonella G., Backus E. H., Nagata Y., Bonthuis D. J., Loche P., Schlaich A., ... Bonn M. Water at charged interfaces. *Nature Reviews Chemistry*. 2021. 5(7). P. 466–485.
10. Оляньська С. П., Цирульнікова В. В. Використання флокулянтів як спосіб підвищення ефективності очищення дифузійного соку. *Цукор України*. 2016. (6–7). С. 18–26.

REFERENCES:

1. Kang, N., Zhou, W., Qi, Z., Li, Y., Wang, Z., Li, Q., & Lv, K. (2022). Recent progress of natural mineral materials in environmental remediation. *Catalysts*, 12(9), 996.
2. Gonzalez, A. G., & Pokrovsky, O. S. (2014). Metal adsorption on mosses: Toward a universal absorption model. *J. Coll. Interface Sci.*, (415), 169–178.
3. Fialkovska, L. V. (2021). Efektyvni sposoby ochyshchennia soniashnykovoi olii vid domishok [Effective ways to purify sunflower oil from impurities]. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu: elektronne naukovе fakhove vydannia – Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University: electronic scientific professional publication*, 11(2), 299–309. [in Ukrainian].
4. Frolova, L. A., & Shunkin, I. S. (2021). Kharakterystyka hlynystykh porid Polozkoho rodovyscha [Characteristics of clay rocks of the Polog deposit]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky – Tavria Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*, (3), 116–123. [in Ukrainian].
5. Matko, S. V., Kostenko Ye. Ye., Melnyk L. M., & Martseniuk O. M. (2008). Sorbenty riznykh typiv [Sorbents of various types]. *Kharchova i pererobna promyslovist – Food and processing industry*, (8–9), 16–17. [in Ukrainian].
6. Melnyk, L. M., Mank V. V., Martsin I. I. (2004). Efektyvnist dii pryrodnykh dyspersnykh mineraliv v ochyshchenni vodno-spyrtovykh rozchyniv [The effectiveness of natural dispersed minerals in the purification of aqueous-alcoholic solutions]. *Naukovi pratsi NUKhT – Scientific works of the NUFT*, (15), 23–25. [in Ukrainian].
7. `Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021). Surfactant adsorption isotherms: A review. *ACS omega*, 6(48), 32342–32348.
8. Tran, H. N., Lima, E. C., Juang, R. S., Bollinger, J. C., & Chao, H. P. (2021). Thermodynamic parameters of liquid–phase adsorption process calculated from different equilibrium constants related to adsorption isotherms: A comparison study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106674.
9. Gonella, G., Backus, E. H., Nagata, Y., Bonthuis, D. J., Loche, P., Schlaich, A.,... & Bonn, M. (2021). Water at charged interfaces. *Nature Reviews Chemistry*, 5(7), 466–485.
10. Olianska, S. P., & Tsyruelnikova, V. V. (2016). Vykorystannia flokuliantiv yak sposib pidvyshchennia efektyvnosti ochyshchennia dyfuziinoho souk [Using flocculants as a way to improve the efficiency of diffusion juice purification]. *Tsukor Ukrainy – Sugar of Ukraine*, (6–7), 18–26. [in Ukrainian].

УДК 548.736.4

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-8>

Андрій СТЕЦЬКІВ

доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри хімії, фармацевтичного аналізу та післядипломної освіти, Івано-Франківський національний медичний університет, вул. Галицька, 2, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018

ORCID: 0000-0001-5166-5633

Scopus Author ID: 6506514434

Ірина ІВАНЧУК

кандидат фармацевтичних наук, доцент, доцент кафедри хімії, фармацевтичного аналізу та післядипломної освіти, Івано-Франківський національний медичний університет, вул. Галицька, 2, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018

ORCID: 0009-0006-4335-8119

Scopus Author ID: 57204935082

Володимир ПАВЛЮК

доктор хімічних наук, професор, професор кафедри неорганічної хімії, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 1, м. Львів, Україна, 79000

ORCID: 0000-0003-1893-2706

Scopus Author ID: 7005030450

Бібліографічний опис статті: Стецьків, А., Іванчук, І., Павлюк, В. (2025). Дослідження фазових перетворень у системі Nd-Li-Ge за температури 400 °С. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 57–67, doi: DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-8>

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У СИСТЕМІ ND-LI-GE ЗА ТЕМПЕРАТУРИ 400 °С

У даній роботі побудовано ізотермічний переріз фазової діаграми стану системи Nd-Li-Ge на основі рентгенівського фазового, мікроструктурного та локального рентгеноспектрального аналізів при температурі 400 °С в діапазоні 30–100 ат. % Ge.

Для синтезу сплавів шматки чистих металів певного стехіометричного складу пресували в таблетки, які поміщали в танталовий тигель і нагрівали до 400 °С. При цій температурі сплави витримували дві доби, потім температуру підвищували до 800 °С протягом однієї години. Зразки, отримані в ході експерименту, піддавалися відпалу при заданій температурі протягом шести годин. Гомогенізуючий відпал для всіх зразків проводили при температурі 400 °С упродовж 480 годин.

Фазовий аналіз сплавів проводили за масивом даних дифракції X-випромінювання, одержаних за допомогою порошкових автоматизованих дифрактометрів ДРОН-2.0М (Fe K α -випромінювання) та STOE STADI P (Cu K α -випромінювання). Кількісне визначення вмісту Літію здійснювалося методом полуменевої фотометрії з використанням приладу Flapho-4. Фазовий склад окремих зразків системи був підтверджений методом енергодисперсійної X-променевої спектроскопії (ЕДХС) у поєднанні з растровим електронним мікроскопом Tescan Vega 3 LMU. Ідентифікацію, розрахунок та індексування дифрактограм, уточнення параметрів елементарних комірок виконували з використанням пакетів програм LATCON, POWDER CELL-2.3. та WinCSD. Визначення та уточнення кристалічної структури методом порошку виконували за допомогою програми FullProf 98.

Результати експериментального дослідження обраної ділянки показали утворення нової тернарної сполуки Nd₂LiGe₆ (структурний тип Pr₂LiGe₆, символ Пірсона oS18, просторова група C_{3h}12, $a = 0.41657(1)$, $b = 2.11079(5)$, $c = 0.43723(2)$ нм). Встановлено формування твердого розчину Nd₅Li_xGe₃ ($x = 0-0.4$) за рахунок часткового включення (до $x = 0.4$) атомів Літію в октаедричні порожнечи вихідної бінарної фази Nd₅Ge₃. За умов експерименту підтверджено літературні дані щодо утворення семи потрібних сполук та для всіх уточнено параметри їх елементарних комірок. Не підтверджено існування сполук NdLi₂Ge та Nd₂LiGe₅ при температурі запропонованого нами відпалу.

Розглянуто особливості фазових взаємодій потрібної системи Nd-Li-Ge та інших споріднених систем, що містять рідкісноземельні метали, Li та Ge. Встановлено, що більшість фаз, які синтезовані у них, кристалі-

зуються у орторомбічній симетрії з відомими структурними типами CaLiSi_2 , ZrNiAl , $\text{Ce}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$, Tm_4LiGe_4 та $\text{Gd}_3\text{Cu}_4\text{Ge}_4$.

Ключові слова: Неодим, Літій, Германій, фазові рівноваги, синтез, кристалічна структура, потрійна сполука, твердий розчин.

Andrij STETSKIV

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry, Pharmaceutical Analysis and Postgraduate Education, Ivano-Frankivsk National Medical University, 2 Halytska str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018

ORCID: 0000-0001-5166-5633

Scopus Author ID: 6506514434

Iryna IVANCHUK

Candidate of Pharmaceutical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Pharmaceutical Analysis and Postgraduate Education, Ivano-Frankivsk National Medical University, 2 Halytska str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018

ORCID: 0009-0006-4335-8119

Scopus Author ID: 57204935082

Volodymyr PAVLYUK

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor at the Department of Inorganic Chemistry, Ivan Franko National University of Lviv, 1 University str., Lviv, Ukraine, 79000

ORCID: 0000-0003-1893-2706

Scopus Author ID: 7005030450

To site this article: Stetskiv, A., Ivanchuk, I., Pavlyuk, V. (2025). Studies of phase transformations in the Nd-Li-Ge system at a temperature of 400 °C [Phazovi rivnovagi v pochetvirnij systemi La-Li-Ni-Ge za temperaturi 400 °C]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 57–67, doi: DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-8>

STUDIES OF PHASE TRANSFORMATIONS IN THE ND-LI-GE SYSTEM AT A TEMPERATURE OF 400 °C

In this work, an isothermal section of the phase diagram of the state of the Nd-Li-Ge system was built on the basis of X-ray phase, microstructural and local X-ray spectral analyzes at a temperature of 400 °C in the range of 30–100 at.% Ge.

For the synthesis of alloys, pieces of pure metals of a certain stoichiometric composition were compressed into tablets, which were placed in a tantalum crucible and heated to 400 °C. At this temperature, the alloys were held for two days, then the temperature was raised to 800 °C for one hour. Samples obtained during the experiment were annealed at a given temperature for six hours. Homogenizing annealing for all samples was carried out at 400 °C for 480 hours.

Phase analysis of alloys was carried out by an array of X-ray diffraction data obtained using powder automated diffractometers DRON-2.0M (Fe K α -radiation) and STOE STADI P (Cu K α_1 -radiation). Quantitative determination of Lithium content was carried out by flame photometry using a Flapho-4 device. The phase composition of individual samples of the system was confirmed by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) in combination with a raster electron microscope Tescan Vega 3 LMU. Identification, calculation and indexing of diffractograms, refinement of parameters of elementary cells was carried out using packages of LATSON, POWDER CELL-2.3 programs and WinCSD. Determination and refinement of the crystal structure by the powder method was performed using the FullProf 98 program.

The results of the experimental study of the selected site showed the formation of a new ternary compound Nd_2LiGe_6 (structural type Pr_2LiGe_6 , the Pearson symbol oS18, the space group Cmmm, $a = 0.41657(1)$, $b = 2.11079(5)$, $c = 0.43723(2)$ nm).

The formation of a solid solution of $\text{Nd}_5\text{Li}_x\text{Ge}_3$ ($x = 0-0.4$) was established due to the partial inclusion (up to $x = 0.4$) of Lithium atoms in the octahedral voids of the initial binary phase of the Nd_5Ge_3 . Under the conditions of the experiment, the literature data on the formation of seven triple compounds were confirmed and the parameters of their elementary cells were clarified for all. The existence of NdLi_2Ge and Nd_2LiGe_5 compounds at the temperature of the annealing proposed by us is not confirmed.

The features of phase interactions of the triple system Nd-Li-Ge and other related systems containing rare earth metals, Li and Ge are considered. It is established that most of the phases synthesized in them crystallize in orthorhombic symmetry with known structural types of CaLiSi_2 , ZrNiAl , $\text{Ce}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$, Tm_4LiGe_4 and $\text{Gd}_3\text{Cu}_4\text{Ge}_4$.

Key words: Neodymium, Lithium, Germanium, phase equilibria, synthesis, crystal structure, ternary compound, solid solution.

Актуальність проблеми. Завдяки своїм унікальним властивостям, сплави на основі Літію знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості, зокрема у виробництві легких конструкційних матеріалів та електродів для акумуляторів (Scrosati, 2010; Pavlyuk 2013). Цілий ряд таких сполук мають корисні фізичні та хімічні властивості. Для створення нових літєвих матеріалів необхідно ретельно досліджувати взаємодію між елементами в системах різної складності, будувати фазові діаграми та визначати кристалічну структуру отриманих фаз.

Неодим – це рідкісноземельний метал, який має широкий спектр застосування в різних галузях промисловості, зокрема у виробництві надзвичайно потужних постійних магнітів, твердотільних лазерів, його додають в якості добавок до сплавів для покращення їх механічних властивостей, таких як міцність і термостійкість. Він є надзвичайно важливим для багатьох сучасних технологій, особливо для виробництва електромобілів та відновлюваних джерел енергії.

Германій має критично важливе значення для розвитку сучасних телекомунікаційних технологій, оптоелектроніки та інфрачервоної техніки. Використовується у виробництві багатошарових сонячних батарей, які мають високу ефективність перетворення сонячного світла в електроенергію. Основний напрям використання Літію на даному етапі – це літій-йонні акумулятори – найпоширеніший тип акумуляторів, що використовуються в сучасних електронних пристроях (смартфони, ноутбуки, планшети) та електромобілях. Вони вирізняються високою енергетичною щільністю, тривалим терміном служби та швидкою зарядкою. Зважаючи на широкий спектр потенційного застосування, ми зацікавилися вивченням взаємодії компонентів в потрібних системах R-Li-X (де R – рідкісноземельний елемент, X – р-елементи IVA групи, такі як Si, Ge і Sn).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення взаємодії рідкісноземельних елементів з Літієм і Германієм з утворенням сполук

ізоструктурних рядів наступних складів проводилося в роботах: RLiGe_2 (Павлюк, 1986), $\text{R}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$ (Павлюк, 1989), R_4LiGe_4 (Павлюк, 1990), RLiGe (Павлюк, 1991), $\text{R}_3\text{Li}_2\text{Ge}_3$ (Павлюк, 1993). Кристалічну структуру тернарної фази $\text{La}_2\text{LiGe}_{6-x}$ (просторова група $Cmmm$, структурний тип Pr_2LiGe_6) було досліджено методом монокристалу і описано в працях (Павлюк, 1992; Stetskiv, 2012). Цю сполуку можна розглядати як представника нового гомологічного ряду на основі структурних типів CaF_2 , ZrSi_2 та AlB_2 . Пізніше, фази RLiGe_2 , $\text{R}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$ та R_4LiGe_4 були уточнені із іншими рідкісноземельними металами авторами (Fornasini, 2012), а також знайдені нові сполуки: $\text{La}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$ ($Immm$, CT $\text{Ce}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$) (Jung, 2012; Guo, 2012), $\text{La}_7\text{Li}_8\text{Ge}_{10}$ ($Cmmm$, новий структурний тип) (Fornasini, 2012; Guo, 2012) і $\text{La}_3\text{Li}_4\text{Ge}_4$ ($Immm$, CT $\text{Gd}_3\text{Cu}_4\text{Ge}_4$) (Fornasini, 2012).

При дослідженні системи Nd-Li-Ge за температури 200 °C (Павлюк, 1992) за допомогою методів рентгеноструктурного аналізу виявлено існування 5 германідів, які характеризуються наступними параметрами: NdLi_2Ge ($P6_3/mmc$, CT Cr_2AlC), NdLiGe_2 ($Pnma$, CT CaLiSi_2), Nd_2LiGe_5 ($Ammm$, CT Ce_2MnGe_5), $\text{Nd}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$ ($Cmcm$, CT $\text{Ce}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$), NdLiGe ($P-62m$, CT ZrNiAl). На відміну від систем з Церієм і Празеодимом у даному дослідженні не було знайдено сполуки Nd_2LiGe_6 . Авторами (Fornasini, 2012; Guo, 2012) досліджувались окремі зразки на предмет утворення потрібних сполук і при цьому встановлено існування наступних: $\text{Nd}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$ ($Immm$, CT $\text{Ce}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$), Nd_4LiGe_4 ($Pnma$, CT Tm_4LiGe_4), $\text{Nd}_7\text{Li}_8\text{Ge}_{10}$ ($Cmmm$, CT $\text{La}_7\text{Li}_8\text{Ge}_{10}$) та $\text{Nd}_3\text{Li}_4\text{Ge}_4$ ($Immm$, CT $\text{Gd}_3\text{Cu}_4\text{Ge}_4$). Спостерігалася область незмішування в потрібній системі до 17 ат. % Ge.

Ознайомлення з діаграмами стану та сполуками подвійних систем, що входять до потрібної Nd-Li-Ge, було одним з ключових етапів, оскільки графіки стабільності фаз показують, за яких температур і концентрацій утворюються різні тверді розчини, хімічні сполуки, рідини. Інформованість про фазові стани подвійних систем дозволяє інтерполювати та

екстраполювати дані для прогнозування поведінки потрійної системи.

Експериментальна діаграма стану системи Li-Ge побудована в інтервалі концентрацій 0–4,5 % (ат.) Ge и 42–100 % (ат.) Ge у роботах (Dadd, 1981; Menges, 1969). В якості вихідних матеріалів було використано Li чистотою 99.8 % (за масою) і Ge чистотою 99.99 % (за масою). Сплави готували в залізних тиглях в атмосфері Ar і досліджували методами диференційного термічного аналізу, металографії та рентгенівської дифракції. В праці (Dadd, 1981) вказано на існування бінарної фази $\text{Li}_{22}\text{Ge}_5$ (18.5 % (ат.) Ge). Кристалічна структура і параметри ґратки для $\text{Li}_{15}\text{Ge}_4$ (21 % (ат.) Ge) описано авторами (Johnson, 1965).

Сполука Li_3Ge плавиться конгруентно (Pell, 1957). В системі існує дві евтектики: при вмісті 50 % (ат.) Ge і температурі 528 ± 10 °C та на стороні Li з температурою, близькою до точки плавлення Li. У роботі (Grüttner, 1981) повідомлено про утворення одразу трьох нових германідів Літію: $\text{Li}_7\text{Ge}_{12}$, $\text{Li}_{12}\text{Ge}_7$ та $\text{Li}_{14}\text{Ge}_6$.

У працях (Frank, 1975) та (Goward, 2001) відповідно авторами встановлено існування сполук складу $\text{Li}_{11}\text{Ge}_6$ та $\text{Li}_{17}\text{Ge}_4$, які кристалізуються в просторових групах $Cmcm$ та

$F43m$ відповідно. Аналіз літературних джерел (Menges, 1969; Evers, 1997) підтверджує факт утворення сполуки LiGe , для якої є характерною просторова група $I4_1/a$. Розчинність Li в (Ge) при температурі 800 °C складає $1.7 \cdot 10^{-2}$ % (ат.).

Діаграма стану системи Nd-Ge була побудована у роботі (Еременко, 1974). Дослідження сплавів включало їх отримання в електродуговій печі в інертній атмосфері та наступний гомогенізуючий відпал. Експериментальну частину виконували методами диференційного термічного, мікроскопічного і рентгеноструктурного аналізів. У системі було виявлено 4 бінарні сполуки. Фази Nd_5Ge_3 та NdGe_{2-x} плавляться конгруентно відповідно при 1580 і 1487 °C. Для всіх германідів Неодиму виявлено незначні області гомогенності, які включають стехіометричні склади. Взаємна розчинність компонентів при евтектичних температурах складає менше 2 % (ат.).

У таблиці 1 приведено відомості про кристалічну структуру подвійних сполук систем Li-Ge та Nd-Ge.

Основна мета цього дослідження полягає в тому, щоб з'ясувати, як взаємодіють компоненти в системі Nd-Li-Ge у концентраційному діапазоні 30–100 ат. % Ge при температурі

Таблиця 1

Кристалічна структура подвійних сполук систем Li-Ge та Nd-Ge

Сполука	Структурний тип	Символ Пірсона	Просторова група	Параметри комірки, нм			Література
				<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
$\text{Li}_{22}\text{Ge}_5$	$\text{Li}_{22}\text{Pb}_5$	cF432	$F43m$	1.886	1.886	1.886	Dadd, 1981
Li_7Ge_2	Li_7Ge_2	oC36	$Cmmm$	0.924(2)	1.321(2)	0.463(1)	Hopf, 1972
$\text{Li}_{11}\text{Ge}_6$	$\text{Li}_{11}\text{Ge}_6$	oC68	$Cmcm$	0.438(1)	2.455(5)	1.064(2)	Frank, 1975
$\text{Li}_{12}\text{Ge}_7$	—	—	—	0.8055	1.1583	1.5418	Grüttner, 1981
Li_9Ge_4	Li_9Ge_4	oS52	$Cmcm$	0.449(1)	0.787(2)	2.444(6)	Hopf, 1970
$\text{Li}_7\text{Ge}_{12}$	$\text{Li}_7\text{Ge}_{12}$	mP78	$P12/c1$	1.1527(5)	$\begin{matrix} 0.8031(1) \\ \beta = 90.0(1)^\circ \end{matrix}$	1.5354(2)	Grüttner, 1981
$\text{Li}_{17}\text{Ge}_4$	$\text{Li}_{17}\text{Ge}_4$	cF436	$F43m$	1.8756(2)	1.8756(2)	1.8756(2)	Goward, 1981
$\text{Li}_{15}\text{Ge}_4$	$\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$	cI76	$I43d$	1.0783(2)	1.0783(2)	1.0783(2)	Johnson, 1965
LiGe	LiGe	tI32	$I4_1/a$	0.9764(3)	0.9764(3)	0.5784(3)	Menges, 1969; Czybulka, 1990 Evers, 1997
NdGe	II	oS8	$Cmcm$	0.4482(1)	1.1102(2)	0.4065(1)	Schobinger Papamantellos, 1985
$\text{NdGe}_{1.66}$	$\alpha\text{-ThSi}_2$	tI12	$I4_1/amd$	0.4180(1)	0.4180(1)	1.3980(3)	Salamakha, 2001
$\text{NdGe}_{1.6}$	$\alpha\text{-GdSi}_2$	oI12	$Imma$	0.422(1)	0.417(1)	1.403(1)	Eremenko, 1974
Nd_3Ge_5	Y_3Ge_5	oF64	$Fdd2$	0.5907(3)	1.7720(1)	1.4024(1)	Schobinger Papamantellos, 1989
Nd_4Ge_7	Nd_4Ge_7	oS44	$C22_1$	0.5958(2)	1.3857(2)	1.1919(4)	Venturini, 1999
Nd_5Ge_3	Mn_5Si_3	hP16	$P6_3/mcm$	0.8743(2)	0.8743(2)	0.6625(1)	Zeng, 2000
Nd_5Ge_4	Sm_5Ge_4	oP36	$Pnma$	0.7863(1)	1.5116(3)	0.7956(1)	Yang, 2002

400 °C; уточнити кристалічну структуру та параметри ґратки відомих тернарних сполук, а також встановити кристалографічні характеристики для нових фаз і твердих розчинів, які утворюються в процесі експерименту.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для дослідження фазових рівноваг нами було підготовлено 52 сплави, використовуючи метали з номінальною чистотою більше 99,9 мас. % (Nd, Li, Ge). Під час першого етапу шматочки із наважок чистих компонентів пресували в гранули, які потім розміщували у танталовому тиглі і нагрівали в індукційній печі до температури 400 °C із швидкістю нагрівання 5 °C/хв. та витримували на протязі 48 годин.

Другий етапу полягав у нагріванні зразків до температури 800 °C та відпалюванні протягом 6 годин, після чого повільно охолодили до кімнатної температури. У зв'язку з тим, що тигель був герметично запаений, що гарантувало відсутність втрат матеріалу, не було необхідності проводити контроль маси шляхом порівняння маси шихти з масою отриманого сплаву. Гомогенізуючий відпал для всіх 52 зразків проводили при температурі 400 °C протягом трьох тижнів. Термічна обробка зразків здійснювалася в муфельній печі МП-60, обладнаній автоматичним регулятором температури з точністю ± 5 °C. Термічно оброблені сплави загартовували в вазеліновій оливі при кімнатній температурі, не порушуючи герметичність ампул. Структурний аналіз зразків, спрямований на визначення їх однорідності та стабільності, проводився за допомогою рентгенографії. Сплави зберігалися під шаром інертної оливи, яка була попередньо підготовлена шляхом очищення та видалення вологи.

Фазовий аналіз сплавів проводили за масивом даних дифракції X-випромінювання, одержаних за допомогою порошкових автоматизованих дифрактометрів ДРОН-2,0М (Fe $K\alpha$ -випромінювання) та STOE STADI P (Cu $K\alpha$ 1-випромінювання). Зйомку даних проводили покроково. Для визначення фазового складу отримані дифрактограми порівнювалися з теоретичними дифрактограмами чистих компонентів та сполук, які можуть існувати у відповідних подвійних та потрійних системах. Для цього використовували програми LATCON (Schwarzenbach, 1966) та PowderCell (Kraus, 1999).

Кристалічну структуру сполук уточнювали методом порошку з використанням пакетів програм WinCSD (Akselrud, 2014) та FullProf (Rodriguez-Carvajal, 1998). Для підтвердження атомного співвідношення елементів у кожній фазі використовували метод енергодисперсійної X-променевої спектроскопії (ЕДХС) у поєднанні з растровим електронним мікроскопом Tescan Vega 3 LMU, обладнаним детектором Oxford Instruments Aztec ONE X-MaxN 20. Точність вимірювань ЕДРС аналізу становить 1 ат.% визначуваного елемента.

Через обмеження класичних рентгенівських методів, вміст Літію в сплавах визначали за допомогою емісійної полуменевої фотометрії. Для цього використовували полуменевий фотометр Carl Zeiss Flapho-4. Розчини досліджуваних та стандартних зразків вводили у полум'я пропан-повітря. Інтерференційний світлофільтр використовували для виділення характерної лінії Літію ($\lambda = 768$ нм). Концентрацію лужного металу визначали за інтенсивністю цієї лінії, це дозволило розрахувати вміст Літію. З відпалених сплавів, маса яких не перевищувала 0,15 г, готували розчини, розчиняючи їх у 20 см³ хлоридної кислоти з концентрацією 1 моль/дм³. Отримані дані щодо вмісту даного елемента в досліджуваних розчинах, виражені в мг/дм³, були використані для розрахунку масової частки лужного металу в сплавах.

Діаграму фазових рівноваг системи Nd-Li-Ge в області 30–100 ат. % Ge побудовано при 400 °C за результатами рентгенівського фазового, мікроструктурного та локального рентгеноспектрального аналізів виготовлених зразків (рис. 1), фотографії мікрошліфів для визначення елементного складу деяких зразків зображено на рис. 2.

Дослідження системи Nd-Li-Ge при 400 °C підтвердило наявність семи раніше описаних сполук (Czybulka, 1990; Павлюк, 1992; Fornasini, 2012; Guo, 2012) та дозволило уточнити параметри їхніх елементарних комірок. Крім того, ідентифіковано існування бінарних фаз подвійних систем Nd-Ge та Li-Ge. При експериментальному вивченні зразків не було виявлено утворення сполук NdLi₂Ge та Nd₂LiGe₅ при температурі запропонованого нами відпалу. Це суперечить даним, отриманим при температурі 200 °C, де ці фази були зафіксовані (Павлюк, 1992). Таблиця 2 містить

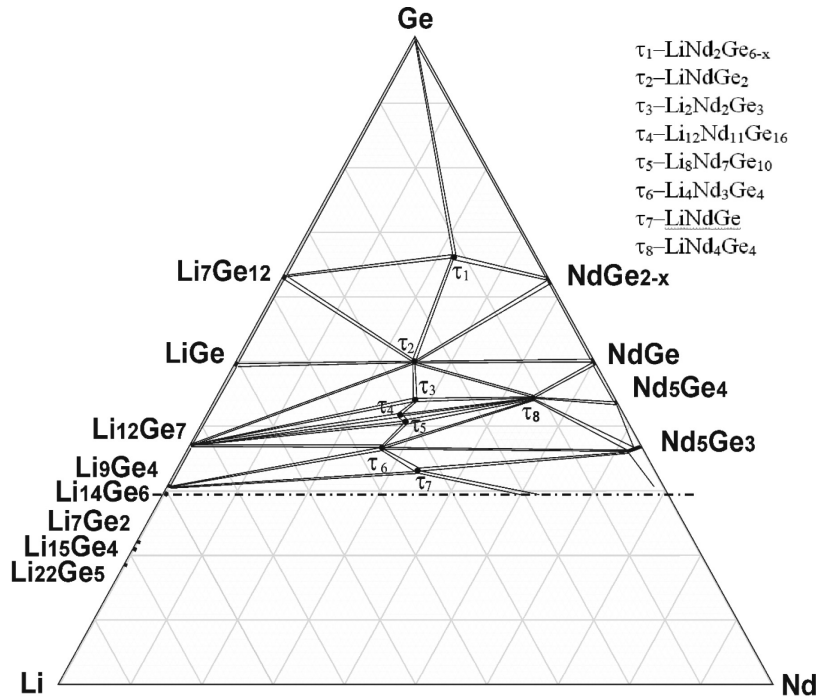


Рис. 1. Ізотермічний переріз діаграми стану системи NdLiGe при 400 °C

кристалографічні характеристики тернарних сполук даної системи.

При температурі 400 °C у системі було встановлено існування твердого розчину включення на основі бінарної фази Nd_5Ge_3 , утвореного шляхом часткового (до $x = 0.4$) введення атомів Літію в октаедричні пустоти її кристалічної решітки. Кристалографічні параметри для сплавів з діапазоном гомогенності цієї фази визначено та уточнено за допомогою даних порошкової дифракції. Розміри кристалічної комірки, отримані при розрахунках вказують на

тенденцію до збільшення об'єму ґратки з підвищенням вмісту Li.

Аналіз хімічних зв'язків та розподілу електронної густини, зокрема за допомогою функції локалізації електронів (ELF), дозволив розкрити механізм формування фази $\text{Nd}_5\text{Li}_x\text{Ge}_3$, утвореної внаслідок впровадження йонів Li^+ . При вивченні розподілу електронної густини в октаедричній структурі вихідної бінарної фази Nd_5Ge_3 , виявлено залишки електронної густини в центрі октаєдрів. Ці залишки можна інтерпретувати як «хвости» електронів, що

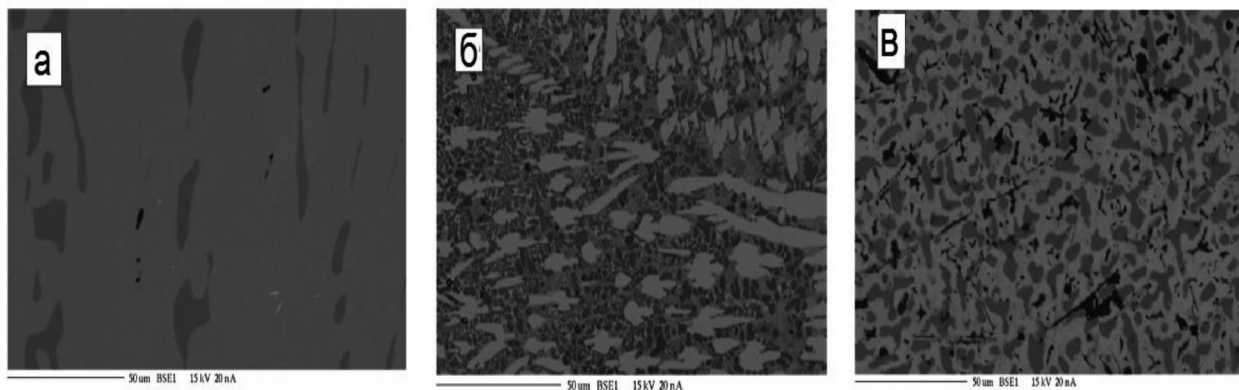


Рис. 2. Фотографії мікроструктури сплавів:

- (a) $\text{Nd}_{20}\text{Li}_{15}\text{Ge}_{65}$ (сіра фаза – τ_1 , склад згідно EPMA $\text{Nd}_{22,6}\text{Li}_{11,3}\text{Ge}_{66,1}$, темна фаза – Ge);
- (б) $\text{Nd}_{60}\text{Li}_{10}\text{Ge}_{30}$ (сіра фаза – $\text{Nd}_5\text{Li}_x\text{Ge}_3$, склад згідно EPMA $\text{Nd}_{59,6}\text{Li}_{4,1}\text{Ge}_{36,3}$; темно-сіра фаза – τ_7 , склад згідно EPMA $\text{Nd}_{33,8}\text{Li}_{33}\text{Ge}_{33,2}$; темна фаза – τ_6);
- (в) $\text{Nd}_{40}\text{Li}_{10}\text{Ge}_{50}$ (сіра фаза – NdGe_3 , темно-сіра фаза – τ_2 , склад згідно EPMA $\text{Nd}_{24,8}\text{Li}_{25}\text{Ge}_{50,2}$)

Структурні особливості потрійних сполук системи Nd-Li-Ge

Сполука	СТ	СП	ПГ	Параметри комірки, нм		
				<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
$\text{Nd}_5\text{Li}_x\text{Ge}_3$ ($x = 0-0,4$)	Hf_5CuSn_3	hP18	$P6_3/mcm$	0.88206(2)	0.88206(2)	0.67802(1)
$\tau_1 - \text{Nd}_2\text{LiGe}_6$	Pr_2LiGe_6	oS18	$Cmmm$	0.41657(1)	2.11079(5)	0.43723(2)
$\tau_2 - \text{NdLiGe}_2$	CaLiSi_2	oP16	$Pnma$	0.77301(1)	0.39181(1)	1.0566(2)
$\tau_3 - \text{Nd}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$	$\text{Ce}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$	oS28	$Cmcm$	0.44153(1)	1.8632(3)	0.6899(1)
$\tau_4 - \text{Nd}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$	$\text{La}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$	oI78	$Immm$	0.44136(1)	0.68691(1)	5.1988(7)
$\tau_5 - \text{Nd}_7\text{Li}_8\text{Ge}_{10}$	$\text{La}_7\text{Li}_8\text{Ge}_{10}$	oS50	$Cmmm$	0.68672(1)	3.3484(7)	0.44156(1)
$\tau_6 - \text{Nd}_3\text{Li}_4\text{Ge}_4$	$\text{Gd}_3\text{Cu}_4\text{Ge}_4$	oI22	$Immm$	0.43927(1)	0.68141(1)	1.46201(6)
$\tau_7 - \text{NdLiGe}$	ZrNiAl	hP9	$P-62m$	0.72669(3)	0.72669(3)	0.45514(2)
$\tau_8 - \text{Nd}_4\text{LiGe}_4$	Tm_4LiGe_4	oP36	$Pnma$	0.73684(2)	1.5118(1)	0.79496(3)

походять від атомів рідкісноземельних металів, які його формують.

Таким чином, існує очевидний факт, що під час термічної або електрохімічної йонізації атома Літію йони Li^+ в основному будуть займати саме ці положення, щоб компенсувати свій позитивний заряд (рис. 3). Аналогічне явище спостерігалось при утворенні твердих розчинів включення $\text{La}_5\text{Li}_x\text{Ge}_3$, $\text{Gd}_5\text{Li}_x\text{Ge}_3$, $\text{La}_5\text{Li}_x\text{Sn}_3$ та $\text{Gd}_5\text{Li}_x\text{Sn}_3$ (Stetskiv, 2014).

У рамках комплексного аналізу потрійних сплавів системи Nd-Li-Ge, що містять значну кількість германію, було отримано та охарактеризовано нову тернарну фазу Nd_2LiGe_6 , яка кристалізується в орторомбічній сингонії з просторовою групою $Cmmm$ з 18 атомами в елементарній комірці. Рентгенівський дифракційний аналіз цієї сполуки продемонстрував її схожість з фазами R_2LiGe_6 ($\text{R} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}$) (Павлюк, 1992; Stetskiv, 2012). Атоми Неодиму у цій структурі заселяють позицію $4i$, атоми Літію розташовуються в $2a$ позиції. Всі атоми Германію розташовуються у положенні $4j$.

Висновки. У результаті проведення серії експериментів з використанням різноманітних методик було отримано діаграму фазових рівноваг трьохкомпонентної системи Nd-Li-Ge в межах концентрацій 30–100 ат. % Ge при 400 °С. Константовано існування бінарних фаз подвійних систем Nd-Ge та Li-Ge. Отримані дані корелюють з попередніми дослідженнями, підтверджуючи наявність семи описаних раніше потрійних сполук. Виявлено існування нового тернарного германіду Nd_2LiGe_6 (структурний тип Pr_2LiGe_6). Спостерігається формування твердого розчину $\text{Nd}_5\text{Li}_x\text{Ge}_3$, яке відбувається за рахунок того, що атоми Літію частково (до $x = 0,4$) входять в октаедричні порожнини кристалічної решітки вихідної фази Nd_5Ge_3 . Кристалічна структура даного розчину характеризується впорядкованістю та належить до структурного типу, що відповідає сполуці Hf_5CuSn_3 .

Незважаючи на значний обсяг літературних та отриманих нами даних щодо потрійних систем R-Li-{Si, Ge, Sn}, повний характер фазових

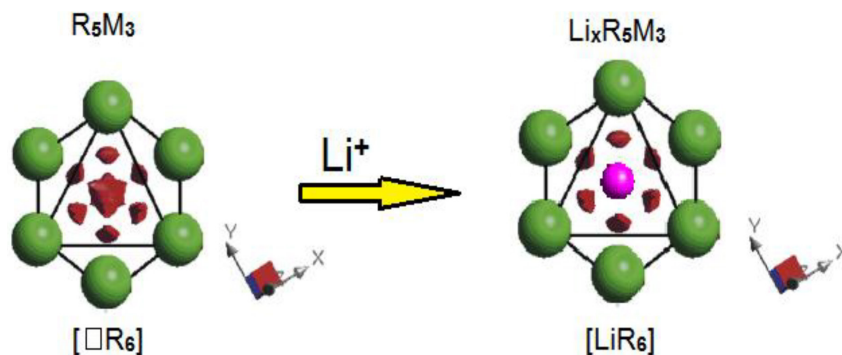


Рис. 3. 3D-ізоповерхня функції електронної локалізації (ELF) у зовнішньому просторі октаедра для вихідної фази R_5M_3 та інтеркальованої $\text{R}_5\text{Li}_x\text{M}_3$

Таблиця 3

Характеристика потрійних систем складу R–Li–Ge

Система	Наявність ізотермічного перерізу	Кількість інтерметалічних сполук
Y–Li–Ge	–	2
La–Li–Ge	+	7
Ce–Li–Ge	+	10
Pr–Li–Ge	+	10
Nd–Li–Ge	+	8
Sm–Li–Ge	+	7
Eu–Li–Ge	–	2
Gd–Li–Ge	+	3
Tb–Li–Ge	–	3
Dy–Li–Ge	–	3
Ho–Li–Ge	+	7
Er–Li–Ge	+	4
Tm–Li–Ge	+	4
Yb–Li–Ge	+	5
Lu–Li–Ge	+	4

рівноваг визначено не для всіх з них. Варто відзначити, що системи R–Li–Ge досліджені найгрунтовніше, про що свідчить побудова ізотермічних перерізів діаграм стану для 11 з них.

У табл. 3. приведено ступінь їх вивченості з урахуванням нашого дослідження.

На основі аналізу літературних та експериментальних даних щодо потрійних систем R–Li–{Si, Ge, Sn} та R–T–{Si, Ge, Sn} (де T = Co, Ni, Cu, Zn) встановлено, що взаємодія з Літієм характеризується більшою простотою порівняно з перехідними елементами, що зумовлено незмішуваністю лужного металу з рідкісноземельними.

Найбільш поширеними складами тернарних сполук у системах R–Li–Ge є наступні: $RLiX_2$, $RLiX$, $R_2Li_2X_3$, $R_3Li_4X_4$, R_4LiX_4 . Необхідно зауважити, що усі фази, які синтезовані у них, кристалізуються у орторомбічній симетрії з відомими структурними типами $CaLiSi_2$, $ZrNiAl$, $Ce_2Li_2Ge_3$, Tm_4LiGe_4 та $Gd_3Cu_4Ge_4$. Вказані системи характеризуються обмеженням формування тернарних сполук (максимальна кількість – 10) та наявністю зон незмішування, що походять з бінарних систем R–Li. Аналіз системи Nd–Li–Ge у порівнянні з іншими системами R–Li–Ge демонструє, що природа рідкісноземельного металу відіграє ключову роль у визначенні фазових рівноваг, кількості та структури утворених у них складних речовин.

ЛІТЕРАТУРА:

- Scrosati B., Garche J. Lithium Batteries: Status, Prospects and Future. *J. of Pow. Sources*. 2010. 195. 2419–2430. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.048>
- Pavlyuk V., Dmytriv G., Chumak I., Gutfleisch O., Lindemann I., Ehrenberg H. High hydrogen content superlightweight intermetallics from the Li–Mg–Si system. *International journal of hydrogen energy*. 2013. 38(14). 5724–5737. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.078>
- Павлюк В. В., Печарський В. К., Бодак О. І. Кристалічна структура сполук $RLiGe_2$ (R = La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu). *Дон. АН УРСР. Сер. А*. 1986. 7. 76–80.
- Павлюк В. В., Печарський В. К., Бодак О. І. Ізотермічний переріз діаграм стану систем Ce–Li–{Si, Ge} при 470 К. *Дон. АН УРСР. Сер. Б*. 1989. 2. 51–54.
- Павлюк В. В., Заводник В. Є. Кристалічна структура сполук R_4LiGe_4 (R = Y, Gd, Er, Tm, Lu). *Дон. АН УРСР. Сер. Б*. 1990. 12. 29–31.
- Павлюк В. В., Бодак О. І., Брусков В. А. Кристалічна структура сполук $RLiGe$ (R = Sm, Er, Tm, Lu). *Дон. АН УРСР. Сер. Б*. 1991. 1. 112–114.
- Павлюк В. В. Синтез і кристалохімія інтерметалічних сполук літію. *Автореф. дис. д-ра хім. наук. Львів*, 1993. 38 с.
- Павлюк В. В., Бодак О. І. Фазові рівноваги в системі Pr–Li–Ge. *Дон. АН УРСР. Сер. Б*. 1992. 2. 78–80.
- Stetskiv A., Misztal R., Pavlyuk V. Crystal and electronic structures of La_2LiGe_{6-x} (x = 0.21) and $La_2LiGe_4Si_2$. *Acta Crystallographica*. 2012. C68. i60–i64. DOI: 10.1107/S0108270112031526
- Fornasini M. L., Palenzona A., Pani M. Crystal chemical features of ternary phases in the R–Li–Ge (R – rare earth element) systems. *Intermetallics*. 2012. 31. 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.06.011>
- Jung Y., Nam G., Jeon J., Kim Y., You T.S. Crystal structure and chemical bonding of novel Li-containing polar intermetallic compound $La_{11}Li_{12}Ge_{16}$. *J. of Solid State Chemistry*. 2012. 196. 543–549. DOI: 10.1016/j.jssc.2012.07.034
- Guo S. P., You T. S., Juang Y. H., Bobev S. Synthesis, crystal chemistry, and magnetic properties of $RE_7Li_8Ge_{10}$ and $RE_{11}Li_{12}Ge_{16}$ (RE = La–Nd, Sm): New members of the $[REGe_2]_n[RELi_2Ge]_m$ homologous series. *Inorg. Chem*. 2012. 51. 6821–6829. DOI: 10.1021/ic300566x
- Павлюк В. В., Бодак О. І. Дослідження систем {Nd, Sm}–Li–Ge. *Дон. АН УРСР. Сер. Б*. 1992. 3. 106–108.

14. Dadd A. T., Hubberstey P. Solubilities of silicon and of germanium in liquid lithium. Lithium–germanium partial phase diagram. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* 1981. 77. 1865–1870. <https://doi.org/10.1039/F19817701865>
15. Menges E., Hopf V., Schafer H., Weiss A. Die Kristallstruktur von LiGe-ein neuartiger, dreidimensionaler Verband von Element(IV)-atomen. *Z. Naturforsch.* 1969. 24(10). 1351–1352.
16. Johnson Q., Smith G.S., Wood D. The crystal structure of $\text{Li}_{15}\text{Ge}_4$. *Acta Crystallogr.* 1965. 18. 131–132.
17. Pell E. M. Solubility of Lithium in germanium. *J. Phys. Chem. Solids.* 1957. 3. 74–76.
18. Grüttner A., Nesper R., Von Schnering H.G. New phases in the Li-Ge System: $\text{Li}_7\text{Ge}_{12}$, $\text{Li}_{12}\text{Ge}_7$, $\text{Li}_{14}\text{Ge}_6$. *Acta Crystallogr. A.* 1981. 37. 161d. DOI: 10.1107/S0108767381094713
19. Frank U., Muller W. $\text{Li}_{11}\text{Ge}_6$ -eine Phase mit isolierten, ebenen Ge-Fünfringen. *Z. Naturforsch.* 1975. 30(3). 313–315.
20. Goward G. R., Taylor N. J., Souza D. C. S., Nazar L. F. The true crystal structure of Li_{17}M_4 (M = Ge, Sn, Pb) – revised from Li_{22}M_5 . *J. Alloys Compd.* 2001. 329. 82–91. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01567-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01567-5)
21. Evers J., Oehlinger G., SEXTL G. LiSi, a unique Zintl phase—although stable, it long evaded synthesis. *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.* 1997. 34. 773–784. <https://doi.org/10.1002/chin.199813026>
22. Hopf V., Muller W., Schafer H. Die Struktur der Phase Li_7Ge_2 . *Z. Naturforsch.* 1972. 27. 1157–1160.
23. Hopf V., Muller W., Schafer H. Die Kristallstruktur der Phase Li_9Ge_4 . *Z. Naturforsch. B.* 1970. 25. 653–655.
24. Eremenko V. N., Batalin V. G., Buyanov Y. I. Phase diagram of the system Nd-Ge. *Inorg. Mater.* 1974. 10. 1188–1192.
25. Schobinger Papamantellos P., Buschow K. H. J. Ferromagnetism of NdGe and PrGe studied by neutron diffraction and magnetic measurements. *J. Less-Common Met.* 1985. 111. 125–138. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(85\)90178-X](https://doi.org/10.1016/0022-5088(85)90178-X)
26. Salamakha P., Sologub O., Demchenko P., Righi L., Bocelli G. Crystal structure of the $\text{NdGe}_{1.66}$ compound. *J. Alloys Compd.* 2001. 315. L1–L3. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)01296-2](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)01296-2)
27. Schobinger Papamantellos P., Buschow K.H.J. Modulated structure and weak ferromagnetism in Nd_3Ge_5 studied by neutron diffraction and magnetic measurements. *J. Magn. Magn. Mater.* 1989. 82. 99–108. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(89\)90069-3](https://doi.org/10.1016/0304-8853(89)90069-3)
28. Venturini G., Ijjaali I., Malaman B. New ordered ThSi_2 -type derivatives in the light rare earths germanides. Crystal structure of Nd_4Ge_7 . *J. Alloys Compd.* 1999. 289. 168–177. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(99\)00178-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00178-4)
29. Zeng L., Franzen H. F. Refinement of the crystal structure of Ge_3Nd_5 . *J. Alloys Compd.* 2000. 313. 75–76. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)00923-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)00923-3)
30. Yang H. F., Rao G. H., Liu G. Y., Ouyang Z. W., Liu W. F. Feng X. M., Chu W. G., Liang J. K. Crystal structure and phase relationships in the pseudobinary system Nd_5Si_4 - Nd_5Ge_4 . *J. Alloys Compd.* 2002. 346. 190–196. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)00524-8](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00524-8)
31. Schwarzenbach D. Program LATCON: refine lattice parameters. *Lausanne: University of Lausanne*, 1966.
32. Kraus W., Nolze G. PowderCell for Windows. *Berlin: Federal Institute for Materials Research and Testing*, 1999.
33. Akselrud L. G., Grin Yu. N. WinCSD: software package for crystallographic calculations (Version 4). *J. Fppl Crystallogr.* 2014. 47. 803–805. DOI: 10.1107/S1600576714001058
34. Rodriguez-Carvajal J. FULLPROF: A Program for Rietveld Refinement and Pattern Matching Analysis, version 3.5d; *Laboratoire Léon Brillouin (CEA-CNRS): Saclay, France*, 1998.
35. Czybulka A., Schauerte W., Schuster H.U. Neue ternäre Germanide des Lithium mit Lanthanoiden im Fe_2P -Typ: LiErGe , LiHoGe , LiNdGe , und LiSmGe . *Z. Anorg. Allg. Chem.* 1990. 580. 45–49. <https://doi.org/10.1002/zaac.19905800106>
36. Stetskiv A., Kordan V., Tarasiuk I., Zelinska O., Pavlyuk V. Structural peculiarities and electrochemical properties of R_5M_3 ($R = \text{La, Gd}$; $M = \text{Ge, Sn}$) doped by lithium. *Chemistry of Metals and Alloys*. 2014. 7(1/2). 106–111. DOI: 10.30970/cma7.0282

REFERENCES:

1. Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium Batteries: Status, Prospects and Future. *J. of Pow. Sources*. 195, 2419–2430. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.048>
2. Pavlyuk, V., Dmytriv, G., Chumak, I., Gutfleisch, O., Lindemann, I., & Ehrenberg, H. (2013). High hydrogen content super-lightweight intermetallics from the Li–Mg–Si system. *International journal of hydrogen energy*. 38(14), 5724–5737. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.078>
3. Pavlyuk, V. V., Pecharsky, V. K., & Bodak, O. I. (1986). Krystalichna struktura spoluk RLiGe_2 ($R = \text{La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu}$) [Crystal structure of RLiGe_2 compounds ($R = \text{La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu}$)]. *Dop. AN URSSR. Ser. A – Reports of the Academy of Sciences USSR. Ser. A*, 7, 76–80. [in Ukrainian].
4. Pavlyuk, V. V., Pecharsky, V. K., & Bodak, O. I. (1989). Izotermichniy pereriz diahrami stanu systemi $\text{Ce-Li-}\{\text{Si, Ge}\}$ pry 470 K [Isothermal section of phase diagrams of $\text{Ce-Li-}\{\text{Si, Ge}\}$ systems at 470 K]. *Dop. AN URSSR. Ser. B. – Reports of the Academy of Sciences USSR. Ser. B*, 2, 51–54. [in Ukrainian].

5. Pavlyuk, V. V., & Zavodnik, V. Ye. (1990). Krystalichna struktura spoluk R_4LiGe_4 ($R = Y, Gd, Er, Tm, Lu$) [Crystal structure of the compound R_4LiGe_4 ($R = Y, Gd, Er, Tm, Lu$)]. *Dop. AN URSSR. Ser. B. – Reports of the Academy of Sciences USSR. Ser. B*, 12, 29–31. [in Ukrainian].
6. Pavlyuk, V. V., Bodak, O. I., & Bruskov, V. A. (1991). Krystalichna struktura spoluk $RLiGe$ ($R = Sm, Er, Tm, Lu$) [Crystal structure of $RLiGe$ compounds ($R = Sm, Er, Tm, Lu$)]. *Dop. AN URSSR. Ser. B. – Reports of the Academy of Sciences USSR. Ser. B*, 1, 112–114. [in Ukrainian].
7. Pavlyuk, V. V. (1993). Syntez i krystalokhimiya intermetalychnykh spoluk litiyu: avtoref. dys. d-ra khim. nauk. [Synthesis and crystal chemistry of intermetallic compounds of lithium]: abstract of the dissertation of Dr. in Chemistry, Lviv, 38 [in Ukrainian].
8. Pavlyuk, V. V., & Bodak, O. I. (1992). Fazovi rivnovahy v systemi Pr-Li-Ge [Phase equilibria in the Pr-Li-Ge system]. *Dop. AN URSSR. Ser. B. – Reports of the Academy of Sciences USSR. Ser. B*, 2, 78–80 [in Ukrainian].
9. Stetskiv, A., Misztal, R., & Pavlyuk, V. (2012). Crystal and electronic structures of La_2LiGe_{6-x} ($x = 0.21$) and $La_2LiGe_4Si_2$. *Acta Crystallographica*. C68, i60–i64. DOI: 10.1107/S0108270112031526
10. Fornasini, M. L., Palenzona, A., & Pani, M. (2012). Crystal chemical features of ternary phases in the R–Li–Ge (R – rare earth element) systems. *Intermetallics*. 31, 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.06.011>
11. Jung, Y., Nam, G., Jeon, J., Kim, Y., & You, T.S. (2012). Crystal structure and chemical bonding of novel Li-containing polar intermetallic compound $La_{11}Li_{12}Ge_{16}$. *J. of Solid State Chemistry*. 196, 543–549. DOI: 10.1016/j.jssc.2012.07.034
12. Guo, S. P., You, T. S., Juang, Y. H., & Bobev, S. (2012). Synthesis, crystal chemistry, and magnetic properties of $RE_7Li_8Ge_{10}$ and $RE_{11}Li_{12}Ge_{16}$ ($RE = La-Nd, Sm$): New members of the $[REGe_2]_m[RELi_2Ge]_m$ homologous series. *Inorg. Chem.* 51, 6821–6829. DOI: 10.1021/ic300566x
13. Pavlyuk, V. V., & Bodak, O. I. (1992). Doslidzhennya system $\{Nd, Sm\}$ -Li-Ge [Investigation of the $\{Nd, Sm\}$ -Li-Ge systems]. *Dop. AN URSSR. Ser. B. – Reports of the Academy of Sciences USSR. Ser. B*, 3, 106–108 [in Ukrainian].
14. Dadd, A.T., & Hubberstey, P. (1981). Solubilities of silicon and of germanium in liquid lithium. Lithium–germanium partial phase diagram. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* 77, 1865–1870. <https://doi.org/10.1039/F19817701865>
15. Menges, E., Hopf, V., Schafer, H., & Weiss, A. (1969). Die Kristallstruktur von LiGe-ein neuartiger, dreidimensionaler Verband von Element(IV)-atomen. *Z. Naturforsch.* 24 (10), 1351–1352.
16. Johnson, Q., Smith, G.S., & Wood, D. (1965). The crystal structure of $Li_{15}Ge_4$. *Acta Crystallogr.* 18, 131–132.
17. Pell, E. M. (1957). Solubility of Lithium in germanium. *J. Phys. Chem. Solids*. 3, 74–76.
18. Grüttner, A., Nesper, R., & Von Schnering, H. G. (1981). New phases in the Li-Ge System: Li_7Ge_{12} , $Li_{12}Ge_7$, $Li_{14}Ge_6$. *Acta Crystallogr. A*. 37, 161d. DOI: 10.1107/S0108767381094713
19. Frank, U., & Muller, W. (1975). $Li_{11}Ge_6$ -eine Phase mit isolierten, ebenen Ge-Fünfringen. *Z. Naturforsch.* 30(3), 313–315.
20. Goward, G. R., Taylor, N. J., Souza, D. C. S., & Nazar, L. F. (2001). The true crystal structure of $Li_{17}M_4$ ($M = Ge, Sn, Pb$) – revised from $Li_{22}M_5$. *J. Alloys Compd.* 329, 82–91. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01567-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01567-5)
21. Evers, J., Oehlinger, G., & Sextl, G. (1997). LiSi, a unique Zintl phase—although stable, it long evaded synthesis. *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.* 34, 773–784. <https://doi.org/10.1002/chin.199813026>
22. Hopf, V., Muller, W., & Schafer, H. (1972). Die Struktur der Phase Li_7Ge_2 . *Z. Naturforsch.* 27, 1157–1160.
23. Hopf, V., Muller, W., & Schafer, H. (1970). Die Kristallstruktur der Phase Li_9Ge_4 . *Z. Naturforsch. B*. 25, 653–655.
24. Eremenko, V. N., Batalin, V. G., & Buyanov, Y. I. (1974). Phase diagram of the system Nd-Ge. *Inorg. Mater.* 10, 1188–1192.
25. Schobinger Papamantellos, P., & Buschow, K. H. J. (1985). Ferromagnetism of NdGe and PrGe studied by neutron diffraction and magnetic measurements. *J. Less-Common Met.* 111, 125–138. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(85\)90178-X](https://doi.org/10.1016/0022-5088(85)90178-X)
26. Salamakha, P., Sologub, O., Demchenko, P., Righi, L., & Bocelli, G. (2001). Crystal structure of the $NdGe_{1.66}$ compound. *J. Alloys Compd.* 315, L1–L3. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)01296-2](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)01296-2)
27. Schobinger Papamantellos, P., & Buschow, K.H.J. (1989). Modulated structure and weak ferromagnetism in Nd_3Ge_5 studied by neutron diffraction and magnetic measurements. *J. Magn. Magn. Mater.* 82, 99–108. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(89\)90069-3](https://doi.org/10.1016/0304-8853(89)90069-3)
28. Venturini, G., Ijjaali, I., & Malaman, B. (1999). New ordered $ThSi_2$ -type derivatives in the light rare earths germanides. Crystal structure of Nd_4Ge_7 . *J. Alloys Compd.* 289, 168–177. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(99\)00178-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00178-4)
29. Zeng, L., & Franzen, H.F. (2000). Refinement of the crystal structure of Ge_3Nd_5 . *J. Alloys Compd.* 313, 75–76. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)00923-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)00923-3)
30. Yang, H. F., Rao, G. H., Liu, G. Y., Ouyang, Z. W., Liu, W. F., Feng, X. M., Chu, W. G., & Liang, J. K. (2002). Crystal structure and phase relationships in the pseudobinary system Nd_5Si_4 - Nd_5Ge_4 . *J. Alloys Compd.* 346, 190–196. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)00524-8](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00524-8)

31. Schwarzenbach, D. (1966). Program LATCON: refine lattice parameters. *Lausanne: University of Lausanne*.
32. Kraus, W., & Nolze, G. (1999). PowderCell for Windows. *Berlin: Federal Institute for Materials Research and Testing*.
33. Akselrud, L. G., & Grin, Yu. N. (2014). WinCSD: software package for crystallographic calculations (Version 4). *J. Appl Crystallogr.* 47, 803–805. DOI: 10.1107/S1600576714001058
34. Rodriguez-Carvajal, J. (1998). FULLPROF: A Program for Rietveld Refinement and Pattern Matching Analysis, version 3.5d; *Laboratoire Léon Brillouin (CEA–CNRS): Saclay, France*.
35. Czybulka, A., Schauerte, W., & Schuster, H.U. (1990). Neue ternäre Germanide des Lithium mit Lanthanoiden im Fe₂P –Typ: LiErGe, LiHoGe, LiNdGe, und LiSmGe. *Z. Anorg. Allg. Chem.* 580, 45–49. <https://doi.org/10.1002/zaac.19905800106>
36. Stetskiv, A., Kordan, V., Tarasiuk, I., Zelinska, O., & Pavlyuk, V. (2014). Structural peculiarities and electrochemical properties of R_5M_3 ($R = \text{La, Gd}$; $M = \text{Ge, Sn}$) doped by lithium. *Chemistry of Metals and Alloys.* 7 (1/2), 106–111. DOI: 10.30970/cma7.0282

УДК 547-32:581.47:582.746.66

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-9>

Юлія ХАРЧЕНКО

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри біології людини, хімії та методики навчання хімії, Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, вул. Роменська, 87, м. Суми, Україна, 40002

ORCID: 0000-0002-8960-2440

Scopus Author ID: 24921271000

Аріна ДАШУТІНА

здобувачка вищої освіти, Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, вул. Роменська, 87, м. Суми, Україна, 40002

Бібліографічний опис статті: Харченко, Ю., Дашутіна, А. (2025). Органічні кислоти сировини *Rhus typhina* L. Проблеми хімії та сталого розвитку, 2, 68–74, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-9>

ОРГАНІЧНІ КИСЛОТИ СИРОВИНИ *RHUS TYPHINA* L

У статті представлено результати дослідження вмісту біологічно активних речовин, органічних кислот та аскорбінової кислоти, у плодах та листі сумах оленерогого (*Rhus typhina* L.). Показано, що рослини цього виду вирізняються високою адаптивністю до умов помірного клімату, декоративністю, стабільною врожайністю, що робить його перспективним об'єктом культивування та сировинної заготівлі.

У ході дослідження проаналізовано кількісний вміст суми органічних кислот та аскорбінової кислоти у різних частинах рослини залежно від тривалості екстрагування та умов проведення екстракції. Встановлено, що вміст досліджуваних сполук є вищим у плодах, порівняно з листям *Rhus typhina* L. Показано, що збільшення тривалості екстрагування сприяє підвищенню вмісту органічних кислот у екстрактах, одержаних із свіжого листа, проте не є ефективним для виділення аскорбінової кислоти внаслідок процесів окиснення її киснем повітря. Для процесу екстрагування із плодів збільшення часу процесу не призводить до значного підвищення вмісту біологічно активних речовин, оскільки основна їх кількість переходить в екстракт протягом першої години.

Доведено ефективність застосування ультразвукового опромінення як фізичного методу інтенсифікації екстрагування біологічно активних речовин з листа. Використання такого підходу сприяє суттєвому підвищенню вмісту як суми органічних кислот, так і аскорбінової кислоти у одержаних екстрактах. У випадку плодів, ультразвукове опромінення не продемонструвало істотної переваги у порівнянні з екстракцією за звичайних умов.

Отримані результати підтверджують доцільність подальшого дослідження сумах оленерогого як джерела перспективної фітосировини з вираженим біоактивним потенціалом. Низька токсичність, високі агротехнічні показники і хімічне багатство цієї рослини зумовлюють її привабливість для фармацевтичної, харчової та косметичної промисловості.

Ключові слова: органічні кислоти, аскорбінова кислота, *Rhus typhina* L., сумах оленерогий, ультразвукове опромінення, біологічно активні речовини.

Yuliia KHARCHENKO

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Human Biology, Chemistry and Methodology of Teaching Chemistry, Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko, 87 Romenska str., Sumy, Ukraine, 40002

ORCID: 0000-0002-8960-2440

Scopus Author ID: 24921271000

Arina DASHUTINA

Higher Education Student, Sumy State Pedagogical University named after A.S. Makarenko, 87 Romenska str., Sumy, Ukraine, 40002

To cite this article: Kharchenko, Yu., Dashutina, A. (2021). Orhanichni kysloty syrovyny *Rhus typhina* L [Organic Acids of *Rhus typhina* L. Plant Raw Material]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 68–74, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-9>

ORGANIC ACIDS OF *RHUS TYPHINA* L. PLANT RAW MATERIAL

The article presents the results of a study on the content of biologically active substances, organic acids, and ascorbic acid in the fruits and leaves of *Rhus typhina* L. It has been shown that this plant species is highly adaptable to temperate climate conditions, has ornamental value, and provides stable yields, which makes it a promising candidate for cultivation and raw material harvesting.

The study analyzed the quantitative content of total organic acids and ascorbic acid in different parts of the plant depending on extraction duration and extraction conditions. It was established that the content of the studied compounds is higher in the fruits compared to the leaves of *Rhus typhina* L. It was demonstrated that increasing the extraction time promotes a higher yield of organic acids in extracts obtained from fresh leaves but is not effective for the extraction of ascorbic acid due to its oxidative degradation upon exposure to air. In the case of fruit extracts, prolonged extraction does not significantly increase the content of biologically active compounds, as the majority of them are released within the first hour.

The effectiveness of ultrasound irradiation as a physical method for intensifying the extraction of biologically active compounds from leaves was confirmed. This approach significantly increases the yield of both total organic acids and ascorbic acid in the extracts. In contrast, ultrasound irradiation showed no significant advantage over conventional extraction when applied to fruits.

The obtained results confirm the relevance of further studies on *Rhus typhina* as a promising source of phytochemical raw material with pronounced bioactive potential. The low toxicity, high agronomic performance, and rich chemical composition of this plant make it attractive for pharmaceutical, food, and cosmetic industries.

Key words: organic acids, ascorbic acid, *Rhus typhina* L., staghorn sumac, ultrasound irradiation, biologically active compounds.

Актуальність проблеми. Органічні кислоти, зокрема аскорбінова, є важливими компонентами у фармацевтичній, харчовій та косметичній промисловості. Вони беруть участь у регуляції кислотно-лужного балансу, обміні речовин, мають антиоксидантну, консервувальну, протимікробну та інші цінні властивості. У зв'язку з цим зростає потреба у пошуку нових, екологічно чистих та доступних джерел органічних кислот природного походження. Одним з перспективних напрямів є дослідження рослинної сировини, яка є стійкою до умов навколишнього середовища, легко культивується, має високий вміст біологічно активних сполук і придатна для промислової заготівлі. У цьому контексті особливий інтерес становлять рослини роду *Rhus*, що поєднують фармакологічну цінність, високу продуктивність та декоративну привабливість, яка сприяє їх широкому впровадженню в міське озеленення. З давніх часів рослини роду *Rhus* були відомими завдяки своїм фармакологічним та кулінарним властивостям, що пояснюється їх унікальним хімічним складом, зокрема широким вмістом різноманітних біологічно активних сполук.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На території України зустрічається вісім видів

сумаху: Сумах запашний (*Rh. aromatica*), Сумах китайський (*Rh. chinensis*), Сумах дубильний (*Rh. coriaria* L.), Сумах голий (*Rh. glabra* L.), Сумах Потаніна (*Rh. potanini*), Сумах гімалайський (*Rh. punjabensis*), Сумах трилопатевий (*Rh. trilobata*), Сумах оленерогий (*Rh. typhina* L.) (Олексійченко, 2014).

Фітохімічні дослідження показали, що сировина *Rhus* містить широкий спектр біоактивних компонентів: поліфеноли, флавоноїди, органічні кислоти, ефірні олії, вітаміни. Ці речовини зумовлюють антимікробну, антиоксидантну, протизапальну, цитотоксичну, протималярійну та інші фармакологічні дії (Орію, 2021). У традиційній медицині рослини роду *Rhus* використовувалися здавна. Вважалося, що завдяки своєму цитрусовому присмаку, використання плодів мало позитивний результат при лікуванні цинги. Крім того, сумаху приписували сечогінну та протигрибкову дію. Дослідження екстрактів, одержаних з різних видів рослин роду *Rhus*, підтверджують їх ефективність проти широкого спектра патогенних мікроорганізмів (Орію, 2021).

Науковці приділяють значну увагу вивченню спектра біологічно активних сполук різних видів сумаха, зокрема сумаха дубильного (*Rh.*

coriaria L.), який традиційно використовується як спеція та ароматизатор (Rayne, 2007). Дослідження показали, що K, Ca, Mg, P, Fe, Na, Zn, Mn, Cu та Al є переважаючими елементами (Ozcan, 2003, Raut, 2014), що містяться у плодах сумаху. Із числа мікроелементів було ідентифіковано Zn, Cu, Fe, Se, Mn, Cr, Mo, Ni та B (Naval, 2023). Варто зазначити, що на вміст мінералів впливають фактори навколишнього середовища та географія місця збору плодів сумаху (Kossah, 2009). Що стосується вмісту вітамінів, плоди сумаху містять тіамін, рибофлавін, піридоксин, ціанокобаламін, нікотинамід, біотин та аскорбінову кислоту (Kossah, 2009, Fereidoonfar, 2019). Значна увага приділяється також і дослідженням антиоксидантних властивостей сумаху. Виявилось, що завдяки потужним антиоксидантним властивостям (Alsamri, 2021, Fereidoonfar, 2019) *Rhus coriaria* може бути корисним для лікування таких патологічних розладів, як травми шкіри (Nozza, 2020), міопатії (Najjar, 2017), надмірна вага та ожиріння (Jamous, 2018).

Перспективним з точки зору вмісту біологічно активних речовин, як показують дослідження (Kossah, 2011, Sekowski, 2023, Liu, 2019, Дашутіна, 2025), є також сумах оленерогий – *Rhus typhina* L. Хоча варто зазначити, що у контексті сучасних досліджень щодо фітохімічного складу цей вид є малодослідженим на території України.

Мета дослідження – проаналізувати потенціал сировини сумаху оленерогого (*Rhus typhina* L.) як джерела біологічно активних речовин, а саме: оцінити вміст суми органічних і аскорбінової кислот у сировині сумаху оленерогого (*Rhus typhina* L.), визначити оптимальні умови екстрагування цих сполук.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сумах оленерогий (сумах пухнастий, *Rhus typhina* L.) відноситься до сімейства анакардієві (Anacardiaceae). Батьківщиною його є східні приатлантичні штати США, а також південні частини канадських провінцій Онтаріо та Квебек (Wei, 2001, Yuan, 2013).

Це один із небагатьох, якщо не єдиний представник роду *Rhus*, що відрізняється високою зимостійкістю і здатний культивуватися на території з помірним кліматом. *Rhus typhina* L. зараз можна зустріти практично у будь-якому місті України у парках та біля житлових будинків.

Плоди сумаха оленерогого, поряд з іншими частинами рослини, популярні у корінних народів Північної Америки (індіанців). Індіанці з плодів готували відвари, які використовували при захворюваннях шлунково-кишкового тракту, авітамінозах (Kossah, 2011, Olchowik, 2012, Wang, 2017).

Про потенційно високий вміст органічних кислот у плодах сумаха говорить той факт, що плоди близького виду дубильного сумаха в регіонах його природного проростання (Туреччина, Балкани) використовуються як цінна харчова добавка для приготування спецій, що надають стравам кислий смак (Qiu, 2022, Mirian, 2015). У регіоні природного зростання сумаха оленерогого (східні штати США) аборигенні народи застосовували плоди сумаха як харчову добавку, що було перейнято сучасною американською культурою. У США комерційними компаніями виготовляються напої з плодів сумаха оленерогого, що мають кислий смак. Вважається, що кислі напої краще втамовують спрагу в спеку, ніж солодкі, традиційно популярні США Кока-Кола і Пепсі (Qiu, 2016).

Безперечною перевагою є той факт, що, як показують дослідження токсичності, сумах є безпечним для споживання людьми та загалом має низьку токсичність (Alsamri, 2021).

Для дослідження ми використовували плоди та листя (як свіже, так і висушене), зібране на початку вересня 2024 року на території м. Суми. Листя сушили природнім способом без потрапляння прямого сонячного світла та у гарно вентильованому приміщенні. Листя ретельно подрібнювали, плоди розтирали у ступці.

Вміст суми вільних органічних кислот визначали титриметрично у перерахунку на яблучну кислоту, вміст аскорбінової кислоти – методом комплексометричного титрування згідно методик (Смаглюк, 2017).

Вільні органічні кислоти та аскорбінову кислоту виділяли із сировини шляхом водної екстракції, для чого брали свіжокип'ячену воду. Визначення ефективності екстракції проводили шляхом відбирання аліквоти через 1 і 2 години. Для визначення впливу ультразвукової обробки на ефективність екстракції, її проводили в умовах ультразвукової бані.

Дослідження екстрактів, одержаних зі свіжоподрібненого листя (табл. 1), показало, що одним із ключових факторів, що впливають на

ефективність екстрагування, є тривалість процесу. Збільшення часу екстракції з 1 до 2 годин призводить до зниження вмісту аскорбінової кислоти у 1,6 рази для свіжого листя та у 1,5 для висушеного. Подібна тенденція до зменшення вмісту аскорбінової кислоти спостерігається і в умовах ультразвукової обробки, хоча виражена меншою мірою – у 1,1 рази. Отримані результати можуть бути поясненими процесами окиснення, які відбуваються з аскорбіновою кислотою під впливом кисню повітря. Збільшення часу екстракції практично не впливає на вміст аскорбінової кислоти в екстрактах із плодів.

Під час екстрагування аскорбінової кислоти зі свіжого листя у водному середовищі за умов ультразвукового опромінення встановлено, що в таких умовах екстракція відбувається значно ефективніше. Використання ультразвуку сприяє збільшенню виходу аскорбінової кислоти – у 2,3 рази (0,3556 % порівняно із 0,154 % без ультразвуку).

Натомість проведення екстракції аскорбінової кислоти із плодів в умовах ультразвукової

обробки суттєво не вплинуло на її ефективність (0,366 % і 0,33 % з ультразвуком). Такий результат може бути пояснений більшою щільністю частинок, утворених під час подрібнення плодів, що ускладнює масообмін під час екстракції.

Результати екстрагування органічних кислот свідчать, що на кількісний вміст цих сполук впливають тривалість процесу екстракції та умови її проведення.

Збільшення часу екстракції сприяє більшій ефективності вилучення суми органічних кислот із сировини сумаха. Так, при збільшенні тривалості процесу з 1 до 2 годин вміст суми органічних кислот збільшується у 1,4 рази для свіжого листя та у 1,12 рази для висушеного. Водночас, для плодів тривалість екстракції практично не впливає на вихід екстрагованих кислот.

Варто зазначити, що вміст суми органічних кислот загалом виявився вищим у плодах сумаха оленерогого порівняно з листям.

Використання ультразвукової обробки під час екстрагування органічних кислот зі

Таблиця 1

Вміст аскорбінової кислоти у листі та плодах *Rhus typhina* L

Екстрагент та умови екстракції	Сировина	Час, години	Аскорбінова кислота, X, %
Водний екстракт	Свіже листя	1	0,154
Водний екстракт	Свіже листя	2	0,0952
Водний екстракт	Сухе листя	1	0,088
Водний екстракт	Сухе листя	2	0,0587
Водний екстракт	Плоди	1	0,366
Водний екстракт	Плоди	2	0,366
Водний екстракт / ультразвук	Свіже листя	1	0,3556
Водний екстракт / ультразвук	Свіже листя	2	0,319
Водний екстракт / ультразвук	Плоди	1	0,33
Водний екстракт / ультразвук	Плоди	2	0,33

Таблиця 2

Вміст суми органічних кислот у листі та плодах *Rhus typhina* L.

Екстрагент та умови екстракції	Сировина	Час, години	Сума органічних кислот, X, %
Водний екстракт	Свіже листя	1	2,78
Водний екстракт	Свіже листя	2	3,90
Водний екстракт	Сухе листя	1	4,45
Водний екстракт	Сухе листя	2	5,02
Водний екстракт	Плоди	1	14,16
Водний екстракт	Плоди	2	14,61
Водний екстракт / ультразвук	Свіже листя	1	3,04
Водний екстракт / ультразвук	Свіже листя	2	9,59
Водний екстракт / ультразвук	Плоди	1	12,33
Водний екстракт / ультразвук	Плоди	2	14,09

свіжого листя сприяє значному підвищенню ефективності процесу – вихід цільових сполук збільшується у 2,5 рази. Для плодів ефективність ультразвукової обробки, як і у випадку з аскорбіновою кислотою, виявилась низькою, що може бути пояснено більшою щільністю подрібнених частинок.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У результаті проведеного дослідження встановлено, що плоди та листя сумаха оленерогого (*Rhus typhina* L.) є перспективною сировиною для отримання біологічно активних речовин, зокрема органічних кислот та аскорбінової кислоти. Адаптивність рослин до умов помірного клімату, гарна декоративність і стабільна врожайність роблять їх доступною та екологічно безпечною сировиною.

З'ясовано, що кількісний вміст суми органічних та аскорбінової кислот є вищим у плодах, ніж у листі сумаха оленерогого.

Досліджено залежність вмісту біологічно активних речовин від тривалості екстрагування.

Збільшення часу екстракції зі свіжого листя сприяє підвищенню виходу органічних кислот, але водночас не є ефективним для виділення аскорбінової кислоти, оскільки сприяє процесам її окиснення. Для плодів збільшення часу екстракції несуттєво впливає на результати, оскільки більшість активних сполук екстрагується протягом першої години.

Визначено, що проведення екстракції в умовах ультразвукової обробки є ефективним для виділення біологічно активних сполук із листя сумаха оленерогого і значно підвищує вихід органічних кислот та аскорбінової кислоти, проте не є ефективним для отримання екстрактів із плодів.

Проведені дослідження, з огляду на низьку токсичність і широке поширення виду, підтверджують доцільність подальшого вивчення хімічного складу сумаха оленерогого як культури з високим біоактивним потенціалом і як потенційного джерела цінної фітосировини для фармацевтичної та харчової промисловості.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Дашутіна А.А., Харченко Ю.В. Сировина сумаха оленерогого як джерело органічних кислот. *Актуальні проблеми дослідження доквілля* : матеріали XI Міжнародної наукової конференції, м. Суми, 22–23 травня 2025 р. Суми, 2025. С. 115–117.
2. Олексійченко Н. О., Китаєв О. І., Борщевський М. О. Сумах оленерогий (*rhus typhina* L.) в умовах м. Києва : монографія / Н.О. Олексійченко, О. І. Китаєв, М. О. Борщевський. Корсунь-Шевченківський, 2014. 151 с.
3. Смаглюк А., Кобернік А. Ідентифікація біологічно активних речовин в екстрактах плодів *citrullus colocynthis*. *Актуальні проблеми транспортної медицини: навколишнє середовище; професійне здоров'я; патологія*. 2017. 4(50). С. 114–119.
4. Alsamri, H., Athamneh, K., Pintus, G., Eid, A. H., Iratni, R. Pharmacological and Antioxidant Activities of *Rhus coriaria* L. (Sumac). *Antioxidants*. 2021. 10(1). 73. <https://doi.org/10.3390/antiox10010073>
5. Fereidoonfar H., Salehi-Arjmand H., Khadivi A., Akramian M., Safdari L. Chemical variation and antioxidant capacity of sumac (*Rhus coriaria* L.). *Industrial Crops and Products*. 2019. 139. 111518. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111518>.
6. Haval A., Fikret K., Dursun Ö., Sinan S. Element and Water-Soluble Vitamins Profile of *Rhus coriaria* L. (Sumac) Grown in Different Regions. *Biological Trace Element Research*. 2023. 202. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03890-y>.
7. Jamous R. M., Abu-Zaitoun S. Y., Akkawi R. J., Ali-Shtayeh M. S. Antiobesity and Antioxidant Potentials of Selected Palestinian Medicinal Plants. *Evid. Based Complement. Altern. Med.: eCAM*. 2018. 8426752. <https://doi.org/10.1155/2018/8426752>.
8. Kossah R., Nsabimana C., Jianxin Z., Haiqin C., Fengwei T., Hao Z., Wei C. Comparative Study on the Chemical Composition of Syrian Sumac (*Rhus coriaria* L.) and Chinese Sumac (*Rhus Typhina* L.) Fruits. *Pak. J. Nutr.* 2009. 8. P. 1570–1574.
9. Kossah R., Zhang H., Chen W. Antimicrobial and antioxidant activities of Chinese sumac (*Rhus typhina* L.) fruit extract. *Food Control*. 2011. 22(1). P. 128–132. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.06.002>
10. Liu T., Li Z., Li R., Cui Y., Zhao Y., Yu Z. Composition analysis and antioxidant activities of the *Rhus typhina* L. stem. *J. Pharm. Anal.* 2019. 9(5). С. 332–338. doi: 10.1016/j.jpha.2019.01.002
11. Mirian M., Behrooeian M., Ghanadian M., Dana N., Sadeghi-Aliabadi H. Cytotoxicity and antiangiogenic effects of *Rhus coriaria*, *Pistacia vera* and *Pistacia khinjuk* oleoresin methanol extracts. *Res. Pharm. Sci.* 2015. 10(3). P. 233–240.
12. Najjar F., Rizk F., Carnac G., Nassar R., Jabak S., Sobolev A.P., Bou Saada Y., El Sabban M., Hamade A. Protective Effect of *Rhus coriaria* Fruit Extracts against Hydrogen Peroxide-Induced Oxidative Stress in Muscle Progenitors and Zebrafish Embryos. *Peer J*. 2017. 5. e4144.

13. Nozza E., Melzi G., Marabini L., Marinovich M., Piazza S., Khalilpour S., Dell'Agli M., Sangiovanni E. Rhus coriaria L. Fruit Extract Prevents UV-A-Induced Genotoxicity and Oxidative Injury in Human Microvascular Endothelial Cells. *Antioxidants*. 2020. 9. P. 292.
14. Olchowik E., Sciepek A., Mavlyanov S., Abdullajanova N., Zamaraeva M. Antioxidant properties of Rhus coriaria L. extracts. *Biomed. Prev. Nutr.* 2012. 2(2). P. 99–105. DOI: 10.1016/j.bionut.2011.06.008
15. Opiyo S. A., Njoroge P. W., Ndirangu E. G., Kuria K. M. A Review of Biological Activities and Phytochemistry of Rhus Species. *Am. J. Chem.* 2021. 11(2). P. 28–36. DOI: 10.5923/j.chemistry.20211102.02
16. Ozcan M. Effect of Sumach (Rhus coriaria L.) Extracts on the Oxidative Stability of Peanut Oil. *J. Med. Food*. 2003. 6. P. 63–66.
17. Qiu D. R., Wang D. C., Yang S. X., Zhang Y. M., Zhang M. Z., Sun J. Z., Cong J., Guo J., He S. L., Qin J. C., Wei D. S. Phenolic profiling and antioxidant potential of Rhus species. *Biochem. Syst. Ecol.* 2016. P. 69. P. 261–265. DOI: 10.1016/j.bse.2016.10.011
18. Qiu K., He W., Zhang H., Wang J., Qi G., Guo N., Zhang X., Wu S. Bio-Fermented Malic Acid Facilitates the Production of High-Quality Chicken via Enhancing Muscle Antioxidant Capacity of Broilers. *Antioxidants*. 2022. 11(12). P. 2309. DOI: 10.3390/antiox11122309
19. Raut J. S., Karuppayil S. M. A Status Review on the Medicinal Properties of Essential Oils. *Ind. Crop. Prod.* 2014. 62. P. 250–264.
20. Rayne S., Mazza G. Biological Activities of Extracts from Sumac (Rhus spp.): A Review. *Plant Foods Hum. Nutr.* 2007. 62. P. 165–175.
21. Sekowski S., Naziris N., Chountoules M., Olchowik-Grabarek E., Czerkas K., Veiko A., Abdullajanova N., Demetzos C., Zamaraeva M. Interaction of Rhus typhina Tannin with Lipid Nanoparticles: Implication for the Formulation of a Tannin-Liposome Hybrid Biomaterial with Antibacterial Activity. *J. Funct. Biomater.* 2023. 14. P. 296. DOI: 10.3390/jfb14060296
22. Wang S., Zhu F. Chemical composition and health effects of sumac (Rhus coriaria L.). *Food Chem.* 2017. 237. P. 431–443. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.05.111
23. Wei Z. P., Liu J. J. Rhus typhina, a good tree species for protection forest. *Protection Forest Sci. Technol.* 2001. 3. P. 81.
24. Yuan Y., Guo W., Ding W., Luo Y., Wang R., Du N., Liu J., Xu F. Effect of environmental factors on Rhus typhina. *Plant Soil*. 2013. 372(1–2). P. 389–400. DOI: 10.1007/s11104-013-1748-3

REFERENCES:

1. Dashutina, A. A., & Kharchenko, Y. V. (2025). *Syrovyna sumakha olenorohoho yak dzherelo orhanichnykh kyslot. [Staghorn sumac raw material as a source of organic acids]*. In *Current Issues in Environmental Research: Proceedings of the 11th International Scientific Conference* (Sumy, May 22–23, 2025, pp. 115–117). Sumy [in Ukrainian].
2. Oleksiichenko, N. O., Kytaiiev, O. I., & Borshchevskyi, M. O. (2014). *Sumakh olenorohyi (Rhus typhina L.) v umovakh m. Kyieva: Monohrafiia*. [Deerhorn sumac (Rhus typhina L.) in the conditions of Kyiv : monograph]. Korsun-Shevchenkivskyi, 151 [in Ukrainian].
3. Smahliuk, A., & Kobernik, A. (2017). Identifikatsiia biologichno aktyvnykh rehovyn v ekstraktakh plodiv *Citrullus colocynthis*. [Identification of biologically active substances in Citrullus colocynthis fruit extracts]. *Aktualni problemy transportnoi medytsyny: navkolyshnie seredovyshe; profesiine zdorovia; patolohiia*, 4(50), 114–119 [in Ukrainian].
4. Alsamri, H., Athamneh, K., Pintus, G., Eid, A. H., & Iratni, R. (2021). Pharmacological and antioxidant activities of Rhus coriaria L. (Sumac). *Antioxidants*, 10(1), 73. <https://doi.org/10.3390/antiox10010073>
5. Fereidoonfar, H., Salehi-Arjmand, H., Khadivi, A., Akramian, M., & Safdari, L. (2019). Chemical variation and antioxidant capacity of sumac (Rhus coriaria L.). *Industrial Crops and Products*, 139, 111518. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111518>
6. Haval, A., Fikret, K., Dursun, Ö., & Sinan, S. (2023). Element and water-soluble vitamins profile of Rhus coriaria L. (Sumac) grown in different regions. *Biological Trace Element Research*, 202, Article 03890-y. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03890-y>
7. Jamous, R. M., Abu-Zaitoun, S. Y., Akkawi, R. J., & Ali-Shtayeh, M. S. (2018). Antiobesity and antioxidant potentials of selected Palestinian medicinal plants. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2018, 8426752.
8. Kossah, R., Nsabimana, C., Jianxin, Z., Haiqin, C., Fengwei, T., Hao, Z., & Wei, C. (2009). Comparative study on the chemical composition of Syrian sumac (Rhus coriaria L.) and Chinese sumac (Rhus typhina L.) fruits. *Pakistan Journal of Nutrition*, 8, 1570–1574.
9. Kossah, R., Zhang, H., & Chen, W. (2011). Antimicrobial and antioxidant activities of Chinese sumac (Rhus typhina L.) fruit extract. *Food Control*, 22(1), 128–132. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.06.002>

10. Liu, T., Li, Z., Li, R., Cui, Y., Zhao, Y., & Yu, Z. (2019). Composition analysis and antioxidant activities of the *Rhus typhina* L. stem. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 9(5), 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2019.01.002>
11. Mirian, M., Behrooeian, M., Ghanadian, M., Dana, N., & Sadeghi-Aliabadi, H. (2015). Cytotoxicity and antiangiogenic effects of *Rhus coriaria*, *Pistacia vera*, and *Pistacia khinjuk* oleoresin methanol extracts. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 10(3), 233–240.
12. Najjar, F., Rizk, F., Carnac, G., Nassar, R., Jabak, S., Sobolev, A. P., Bou Saada, Y., El Sabban, M., & Hamade, A. (2017). Protective effect of *Rhus coriaria* fruit extracts against hydrogen peroxide-induced oxidative stress in muscle progenitors and zebrafish embryos. *PeerJ*, 5, e4144.
13. Nozza, E., Melzi, G., Marabini, L., Marinovich, M., Piazza, S., Khalilpour, S., Dell'Agli, M., & Sangiovanni, E. (2020). *Rhus coriaria* L. fruit extract prevents UV-A-induced genotoxicity and oxidative injury in human microvascular endothelial cells. *Antioxidants*, 9(4), 292.
14. Olchowik, E., Sciepek, A., Mavlyanov, S., Abdullajanova, N., & Zamaraeva, M. (2012). Antioxidant properties of *Rhus coriaria* L. extracts. *Biomedicine and Preventive Nutrition*, 2(2), 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.bionut.2011.06.008>
15. Opiyo, S. A., Njoroge, P. W., Ndirangu, E. G., & Kuria, K. M. (2021). A review of biological activities and phytochemistry of *Rhus* species. *American Journal of Chemistry*, 11(2), 28–36. <https://doi.org/10.5923/j.chemistry.20211102.02>
16. Ozcan, M. (2003). Effect of sumach (*Rhus coriaria* L.) extracts on the oxidative stability of peanut oil. *Journal of Medicinal Food*, 6(1), 63–66.
17. Qiu, D. R., Wang, D. C., Yang, S. X., Zhang, Y. M., Zhang, M. Z., Sun, J. Z., Cong, J., Guo, J., He, S. L., Qin, J. C., & Wei, D. S. (2016). Phenolic profiling and antioxidant potential of *Rhus* species. *Biochemical Systematics and Ecology*, 69, 261–265. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2016.10.011>
18. Qiu, K., He, W., Zhang, H., Wang, J., Qi, G., Guo, N., Zhang, X., & Wu, S. (2022). Bio-fermented malic acid facilitates the production of high-quality chicken via enhancing muscle antioxidant capacity of broilers. *Antioxidants*, 11(12), 2309. <https://doi.org/10.3390/antiox11122309>
19. Raut, J. S., & Karuppayil, S. M. (2014). A status review on the medicinal properties of essential oils. *Industrial Crops and Products*, 62, 250–264.
20. Rayne, S., & Mazza, G. (2007). Biological activities of extracts from sumac (*Rhus* spp.): A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62(4), 165–175.
21. Sekowski, S., Naziris, N., Chountoules, M., Olchowik-Grabarek, E., Czerkas, K., Veiko, A., Abdulladjanova, N., Demetzos, C., & Zamaraeva, M. (2023). Interaction of *Rhus typhina* tannin with lipid nanoparticles: Implication for the formulation of a tannin-liposome hybrid biomaterial with antibacterial activity. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(6), 296. <https://doi.org/10.3390/jfb14060296>
22. Yuan, Y., Guo, W., Ding, W., Luo, Y., Wang, R., Du, N., Liu, J., & Xu, F. (2013). Effect of environmental factors on *Rhus typhina*. *Plant and Soil*, 372(1–2), 389–400. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1748-3>
23. Wang, S., & Zhu, F. (2017). Chemical composition and health effects of sumac (*Rhus coriaria* L.). *Food Chemistry*, 237, 431–443. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.111>
24. Wei, Z. P., & Liu, J. J. (2001). *Rhus typhina*, a good tree species for protection forest. *Protection Forest Science and Technology*, 3, 81.

УДК 546.56+546.47+546.72:543.4:543.42

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-10>

В'ячеслав ЧОБОТАР

аспірант кафедри аналітичної і біонеорганічної хімії та якості води, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041

ORCID: 0000-0003-2604-2121

Володимир КОПЛЕВИЧ

доктор хімічних наук, професор, професор кафедри аналітичної і біонеорганічної хімії та якості води, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041

ORCID: 0000-0001-7987-1084

Бібліографічний опис статті: Чоботар, В., Копілевич, В. (2025). Хіміко-аналітичне дослідження комплексоутворення наночастинок Cu, Zn, Fe з карбамідом. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 75–83, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-10>

ХІМІКО-АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСОУТВОРЕННЯ НАНОЧАСТИНОК Cu, Zn, Fe З КАРБАМІДОМ

У роботі представлено результати комплексного хіміко-аналітичного дослідження процесів комплексоутворення наночастинок міді (Cu), цинку (Zn) та заліза (Fe) з карбамідом у водному середовищі. Актуальність теми зумовлена необхідністю стабілізації наночастинок перехідних металів для подальшого застосування в агрохімії, біомедицині та екотехнологіях. Зважаючи на їх високу реактивність, здатність до комплексоутворення та відносно низьку токсичність у наночастинці, Cu-, Zn- та Fe-наночастинок демонструють значний потенціал для створення новітніх функціональних матеріалів.

Основною метою дослідження було з'ясування структурних і координаційних особливостей взаємодії наночастинок з карбамідом як лігандом і стабілізатором. Синтезовані наночастинок досліджували методами спектрофотометрії, трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ), FTIR-спектроскопії та рентгеноструктурного аналізу (XRD). Було встановлено, що співвідношення метал/ліганд 3:1 є оптимальним для ефективного комплексоутворення. За результатами ТЕМ спостерігалася значна зміна морфології частинок після стабілізації – утворення кластерів з ореолом органічної природи.

FTIR-спектроскопія підтвердила утворення координаційних зв'язків Cu–O, Zn–N, Fe–O з функціональними групами карбаміду. Найбільш виражене комплексоутворення встановлено для Cu, що супроводжувалося структурними змінами в нижньочастотному діапазоні спектра. Рентгенофазовий аналіз виявив збереження кристалічної структури основної фази металів, а також наявність оксидних домішок (Cu₂O, Fe₃O₄), що свідчить про часткове окиснення. Ширина піків XRD вказує на нанорозмірність отриманих структур.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що хімічна природа металу істотно впливає на ефективність та стабільність комплексоутворення з карбамідом. Представлені дані можуть бути використані для подальшої розробки наноструктурованих матеріалів з заданими функціональними властивостями.

Ключові слова: наночастинок металів, карбамід, комплексоутворення, FTIR-спектроскопія, рентгеноструктурний аналіз.

Viacheslav CHOBOTAR

Postgraduate Student at the Department of Analytical and Bioinorganic Chemistry and Water Quality, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroyiv Oborony str., Kyiv, Ukraine, 03041

ORCID: 0000-0003-2604-2121

Volodymyr KOPILEVICH

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor at the Department of Analytical and Bioinorganic Chemistry and Water Quality, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroyiv Oborony str., Kyiv, Ukraine, 03041

ORCID: 0000-0001-7987-1084

To cite this article: Chobotar, V., Kopilevich, V. (2024). Khimiko-analitychne doslidzhennia kompleksoutvorennia nanochastynok Cu, Zn, Fe z karbamidom [Chemical and analytical study of complex formation of Cu, Zn, Fe nanoparticles with carbamide]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 75–83, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-10>

CHEMICAL AND ANALYTICAL STUDY OF THE COMPLEX FORMATION OF Cu, Zn, AND Fe NANOPARTICLES WITH CARBAMIDE

This paper presents the results of a comprehensive chemical and analytical study of the complexation processes of copper (Cu), zinc (Zn), and iron (Fe) nanoparticles with urea in an aqueous medium. The relevance of the topic is due to the need to stabilize the nanoforms of transition metals for further use in agrochemistry, biomedicine, and environmental technologies. Due to their high reactivity, complexation ability, and relatively low toxicity in the nanoform, Cu-, Zn-, and Fe-nanoparticles show great potential for the creation of new functional materials.

The main objective of the study was to elucidate the structural and coordination features of the interaction of nanoparticles with urea as a ligand and stabilizer. The synthesized nanoparticles were studied by spectrophotometry, transmission electron microscopy (TEM), FTIR spectroscopy, and X-ray diffraction (XRD). It was found that a metal/ligand ratio of 3:1 is optimal for effective complex formation. TEM results showed a significant change in particle morphology after stabilization – the formation of clusters with an organic halo.

FTIR spectroscopy confirmed the formation of Cu–O, Zn–N, and Fe–O coordination bonds with functional groups of urea. The most pronounced complex formation was found for Cu, accompanied by structural changes in the low-frequency range of the spectrum. X-ray phase analysis revealed the preservation of the crystalline structure of the main phase of metals, as well as the presence of oxide impurities (Cu₂O, Fe₃O₄), indicating partial oxidation. The width of the XRD peaks indicates the nanoscale of the obtained structures.

The results obtained allow us to conclude that the chemical nature of the metal significantly affects the efficiency and stability of complex formation with urea. The presented data can be used for further development of nanostructured materials with specified functional properties.

Key words: metal nanoparticles, urea, complex formation, FTIR spectroscopy, X-ray structural analysis.

Актуальність проблеми. Стрімкий розвиток нанотехнологій актуалізував дослідження щодо використання наночастинок перехідних металів (Cu, Zn, Fe) у біологічних, медичних і агропромислових застосуваннях, зокрема як компонентів для позакореневого внесення в рослинництві. Висока площа поверхні, реактивність і здатність до комплексоутворення з біоактивними сполуками забезпечують їм значний потенціал як нанодобрив, переносників активних речовин і сенсорів.

Особливої наукової уваги заслуговує вивчення механізмів взаємодії наночастинок металів з низькомолекулярними лігандами, такими як карбамід, що може виконувати функцію стабілізатора, ліганду або транспортної молекули. Суттєвою перевагою наноформ металів є їх знижена токсичність порівняно з традиційними солями, що розширює можливості їх використання в живих системах. Проте недостатня стабільність наночастинок у водних середовищах обмежує їх практичну ефективність, що обумовлює необхідність розробки ефективних методів стабілізації.

У цьому контексті актуальним є хіміко-аналітичне дослідження комплексоутворення

наночастинок Cu, Zn та Fe з карбамідом як потенційним стабілізатором та лігандом. Аналіз комплексів із застосуванням спектрофотометричних, електронномікроскопічних, ІЧ-спектроскопічних та рентгеноструктурних методів дозволяє не лише глибше зрозуміти природу взаємодій, але й оптимізувати умови для збереження наноструктурованого стану матеріалів, що є критично важливим для забезпечення їх стабільності та функціональності в агрохімії, фармації та біотехнологіях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інноваційні розробки у сфері нанотехнологій значно активізували дослідження щодо позакореневого застосування інженерних наночастинок (НЧ) як нанодобрив, наносенсорів та нанотранспортерів у різних галузях агропромислового комплексу. Високе співвідношення поверхні до об'єму, середній розмір частинок менше ніж 100 нм та підвищена реактивність обумовлюють їхню ефективність у низці технологічних процесів (Shahrekiad, 2015, с. 118; Yu, 2017, с. 11272; Kolencik, 2020, с. 1619; Jurkow, 2020, с. 290). Завдяки своїй каталізаторній активності (Wu, 2020, с. 114117) і здатності до функціоналізації різними активними групами,

наночастинки мають підвищену біодоступність і краще поглинаються клітинами (El Amerany, 2020, с. 6–10).

Разом із тим токсичність традиційних сполук перехідних металів обмежувала їхнє широке застосування в біологічних системах. Водночас наноформи цих металів, зокрема міді, цинку та заліза, є істотно менш токсичними. Згідно з дослідженнями, наноформи міді виявилися в 7 разів, цинку – у 30 разів, а заліза – у 40 разів менш токсичними, ніж відповідні сульфатні солі (Борисевич, 2009, с. 121).

Із розвитком нанотехнологій було відкрито нові перспективи застосування перехідних металів у біології, ветеринарії та медицині (Борисевич, 2009, с. 85). Методи синтезу наночастинок поділяють на три основні підходи: формування частинок через об'єднання атомів або молекул; механічне диспергування твердих тіл до нанорозмірів; а також комбіновані методи, які поєднують обидва підходи.

Хімічні методи синтезу характеризуються як перевагами, так і недоліками, проте саме методи, засновані на випаровуванні з твердого тіла з наступною конденсацією, мають потенціал для масштабного виробництва наноматеріалів завдяки можливості контролю розміру та морфології частинок (Косінов, 2008, с. 2–5).

З хімічної точки зору, механізми формування наночастинок у водному середовищі зазвичай складніші порівняно з неводними системами через домінування реакції подвійного заміщення з утворенням осадів нанорозмірних частинок. Зростання таких частинок, як правило, одразу припиняється завдяки дії стабілізуючих агентів. Саме тому підбір стабілізаторів для використання НЧ в рослинництві для позакореневого нанесення є актуальним.

Мета дослідження

Встановити особливості комплексоутворення наночастинок міді (Cu), цинку (Zn) та заліза (Fe) з карбамідом у водному середовищі на основі хіміко-аналітичних методів дослідження з метою оптимізації умов їх стабілізації та оцінки впливу на фізико-хімічні властивості наноструктур.

Завдання дослідження

1. Синтезувати наночастинки Cu, Zn та Fe у водному середовищі та провести їх попередню характеристику методами електронної мікроскопії.

2. Визначити умови утворення комплексів наночастинок з карбамідом і дослідити ефективно співвідношення метал/ліганд за спектрофотометричними даними.

3. Провести порівняльний аналіз структурних змін наночастинок до та після стабілізації з використанням FTIR-спектроскопії та XRD-аналізу.

4. З'ясувати вплив хімічної природи металу на ступінь комплексоутворення та стабільність наночастинок у присутності карбаміду.

5. Оцінити можливості практичного застосування стабілізованих наночастинок у агрохімічних або біомедичних технологіях.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У межах дослідження було проведено комплекс хіміко-аналітичних експериментів, спрямованих на встановлення структурних та координаційних особливостей комплексоутворення наночастинок міді, цинку та заліза з карбамідом у водному середовищі. Об'єктами дослідження були золі наночастинок Cu, Zn та Fe з концентрацією 0,01 М, у водному розчині. На першому етапі наночастинки у воді були осажені на центрифугі та видалено надлишкову вологу при 50–60 °С для подальшого їх дослідження методами. Аналітичні дослідження отриманих водних дисперсій та самих частинок Cu і Zn дають уявлення про їх структуру та властивості. Для дослідження структури зразків нанорозчинів. Об'єктами дослідження були золі наночастинок Cu, Zn та Fe з концентрацією 0,01 М, у водному розчині.

На першому етапі наночастинки у воді були осажені на центрифугі та видалено надлишкову вологу при 50–60 °С для подальшого їх дослідження методами. Аналітичні дослідження отриманих водних дисперсій та самих частинок Cu і Zn дають уявлення про їх структуру та властивості. Для дослідження структури зразків нанорозчинів виготовлялися препарати, аналіз яких проводили в трансмісійному TEM 1230 (Jeol, Tokyo, Japan) електронному мікроскопі.

Наступним етапом було проведення серії симбатних розведень для вивчення комплексоутворення з карбамідом. Вимірювання проводили на спектрофотометрі при довжині хвилі для Cu 585 нм, для заліза нм. Дослідження проводили на спектрофотометрі SF Optizen Pop, Daejeon, Republic of Korea.

Після дослідження комплексоутворення була проведена трансмісійна електронна мікроскопія

(ТЕМ) на електронному мікроскопі 1230 (Jeol, Tokyo, Japan). Було зроблено знімки наночастинок з лінійкою 50 та 100 нм.

Розчини наночастинок металів були відділені на центрифугі. Отримані осад досліджували методами ІЧ спектроскопії та рентгенівської спектроскопії.

Результати проведених досліджень

Особливістю наночастинок є їх окислення, особливо при диспергуванні у водному розчині. Саме тому, на першому етапі нами було проведено мікроскопію наночастинок Купруму, Цинку та Феруму. Дані наведені на рис. 1.

Частинки мають неправильну форму та сильно агломеровані – це типово для наночастинок, особливо при синтезі у водному середовищі без стабілізатора. Спостерігаються окремі сфероподібні наночастинки. Розмір окремих частинок – у межах 20–80 нм. Спостерігаються різні зони контрастності: темніші ділянки можуть вказувати на агломерати, тоді як світліші – на менші або частково аморфні фрагменти.

Для розуміння взаємодії наночастинок з карбамідом було проведено комплексоутворення та також оцінено ефективне співвідношення

метал/ліганд. Оскільки цинк у розчині має білий колір на спектрофотометрі сполуки дослідити важко. Саме тому для цього нами було вибрано наночастинки Cu як модельні для таких взаємодій. Дані спектрів симбатних серій наведено на рис. 2.

Отже, при дослідженні оптичної густини комплексних сполук наночастинок з карбамідом найбільш доцільними є співвідношення метал/ліганд 1/5 та 3/1. Саме співвідношення 3/1 ми застосували для стабілізації наночастинок та їх подальших досліджень.

Після стабілізації було проведено мікроскопію отриманих зразків та порівняння їх з вихідними наночастинками без стабілізації. Дані наведені на рис. 2.

Зі знімків ТЕМ видно, що спостерігається пухка агрегація – наночастинки не злиті, але згруповані в кластери. Частинки оточені світлішим ореолом, що вказує на наявність органічної стабілізуючої оболонки – у даному випадку карбаміду (сечовини). Видимі міжчастинкові порожнини, що характерно для пористих структур або слабкої агломерації.

Наступним етапом було вимірювання FTIR спектрів осаджених наночастинок для оцінки їх структури. Дані наведені на рис. 4

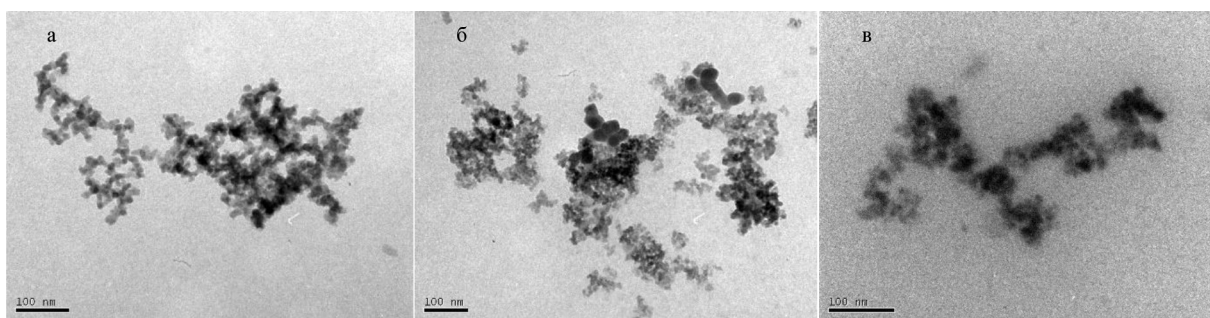


Рис. 1. Наночастинки Cu (а), Zn (б) та Fe (в)

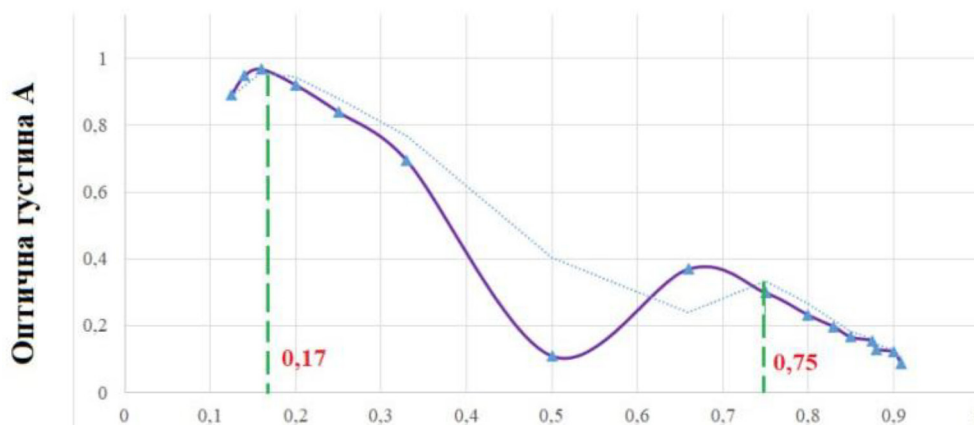


Рис. 2. Оптична густина симбатних серій Cu/0,1 М розчин карбаміду

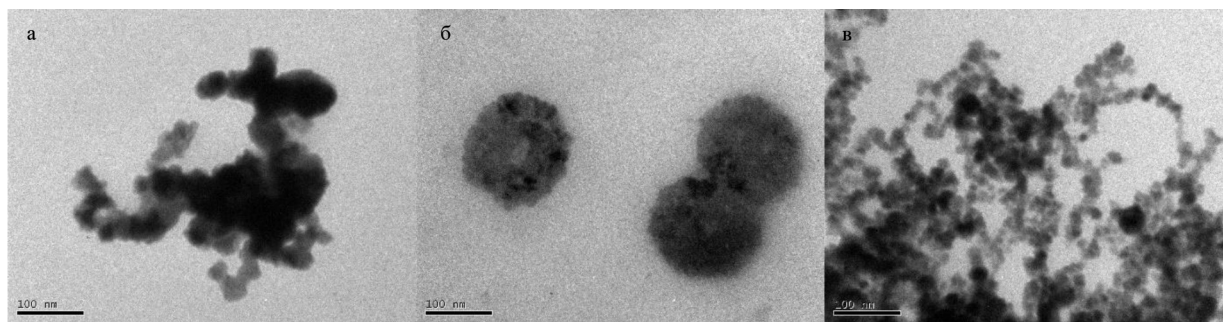


Рис. 3. Стабілізовані наночастинки Cu (а), Zn (б) та Fe (в)

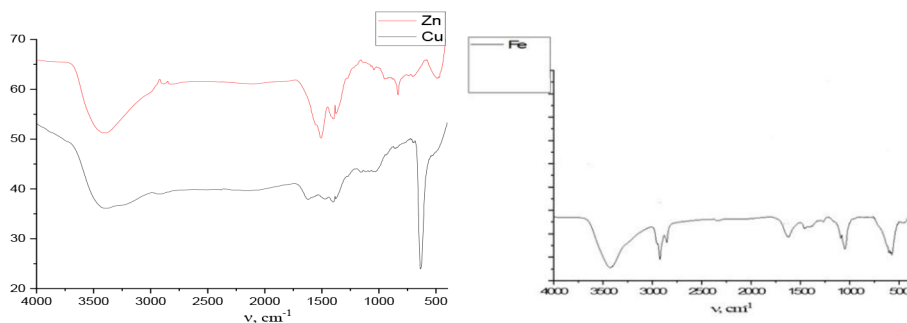


Рис. 4. FTIR спектри наночастинок металів

По FTIR спектру не стабілізованих наночастинок металів можна зробити наступні висновки:

- $\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$ – широка смуга, спільна для всіх зразків, характерна для О—Н коливань (гідроксильні групи або волога), що часто присутня на поверхні наночастинок.
- $\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ – можлива поява деформаційного коливання Н—О—Н

У наночастинок цинку на графіку при $500\text{--}600 \text{ cm}^{-1}$ видно типовий діапазон для Zn—О зв'язків, що підтверджує присутність ZnO-фази.

Для Cu видно менш виражені О—Н або H_2O смуги, що свідчить про іншу природу поверхні або кращу дегідратацію.

Характерні для Fe—О коливань (метал-кисень):

- $\sim 580\text{--}560 \text{ cm}^{-1}$ – типовий пік Fe—О в $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ або Fe_3O_4
- $\sim 690\text{--}750 \text{ cm}^{-1}$ – можливі зміщення, якщо присутні домішки або часткове окиснення

Для порівняння ми проводили вимірювання FTIR спектрів на зразках, стабілізованих у 0,1 М розчині карбаміду. Це дало нам змогу порівняти та зробити висновки про стабілізацію наночастинок. Дані наведені на рис. 3.

У порівнянні з попередніми спектрами при стабілізації карбамідом можемо побачити зміни. Для Fe urea (зелений) слабкіша зона поглинання

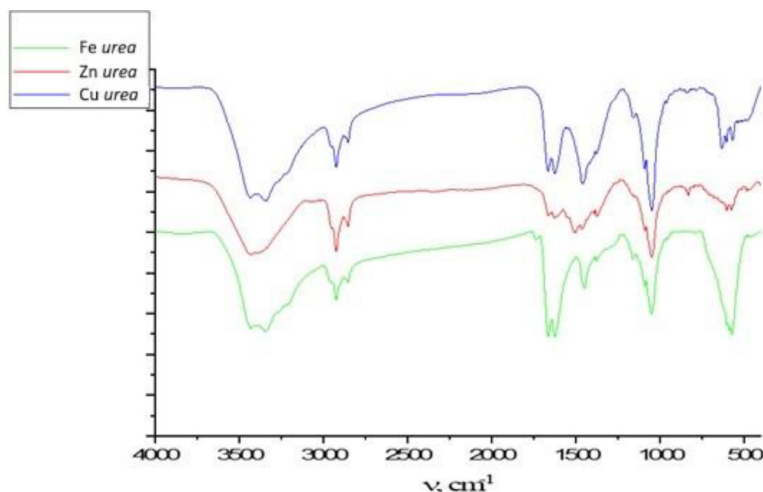


Рис. 5. FTIR спектри наночастинок стабілізованих у розчині карбаміду

у 3400 см^{-1} – менш гідрофільна поверхня або вища кристалічність. Пік $\sim 580\text{ см}^{-1}$ чітко відповідає Fe—O зв'язкам (типово для Fe_3O_4). Всі основні інфрачервоні поглинання карбаміду присутні, але інтенсивність менша, що можливо через слабше зв'язування. Також можлива конкуренція з водою (OH^-), оскільки поверхня $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ гідрофільна й сильно зв'язує воду – частина піків у зоні $3300\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ може перекриватися з H—O—H .

Для цинку Zn urea (червоний): Сильна смуга при 3400 см^{-1} – інтенсивне водне зв'язування. Потужні піки в зоні $1000\text{--}1400\text{ см}^{-1}$ C=O зв'язки, типові для комплексу Zn-сечовина.

Для Cu urea (синій) найбільш виражена структура в нижньочастотному діапазоні ($<1000\text{ см}^{-1}$), що свідчить про сильне комплексотворення. Пік близько 620 см^{-1} свідчить про зв'язки Cu—O. У діапазоні $1400\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ – розщеплення піків, що свідчить про координаційні взаємодії з сечовиною.

Наступним етапом досліджень було отримання інформації із порошкової рентгенограми (XRD) про структуру наночастинок та їх стабілізацію в розчині.

XRD-аналіз наночастинок цинку стабілізованих у розчині карбаміду зображено на рис. 5:

Основні піки на діаграмі: Пік $\sim 31.8^\circ$ (2θ) відповідає кристалографічній площині (100), є одним із головних рефлексів для гексагональної вюрцитової структури ZnO, $\sim 34.4^\circ$ (2θ) та $\sim 36.3^\circ$ (2θ) та формують характерний набір для

гексагональної фази ZnO (вюрцит). Ширина піків свідчить про нанорозмірність, оскільки піки мають ширину на піввисоті (FWHM), що значно більша, ніж у звичайних порошках. Це свідчить про дуже малий розмір кристалітів. Розмір ми можемо розрахувати за формулою Шерера:

$$d = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta},$$

де d – Середній розмір кристалітів (в нанометрах або ангстремах); K – Коефіцієнт форми (константа Шерера): зазвичай $0.89\text{--}0.94$, типово 0.9 ; λ – Довжина хвилі рентгенівського випромінювання (в Å або нм): для Zn $K\alpha$ складає 0.15406 нм ; β – Ширина піку на піввисоті (FWHM) в радіанах (не в градусах); θ – Половина кута дифракції (Bragg) у радіанах.

Згідно з формулою Шерера, розмір Zn оцінюється в межах $10\text{--}30\text{ нм}$, що збігається з даними мікроскопії. Отже, спектр підтверджує, що зразок – це чистий гексагональний ZnO. Широкі піки свідчать про нанорозмірність частинок. Наявність незначного шуму може вказувати на наявність стабілізатора.

На наступному етапі було проведено XRD-аналіз наночастинок Cu стабілізованих карбамідом, що наведений на рис. 6:

Опис основних піків: сновною фазою є Cu^0 (мідь). Пік $\sim 43.3^\circ$ – найінтенсивніший, площина (111) міді. Пік $\sim 50.4^\circ$ – площина (200). Обидва дуже чіткі та вузькі, тому свідчать про високу кристалічність та наявність металічної міді

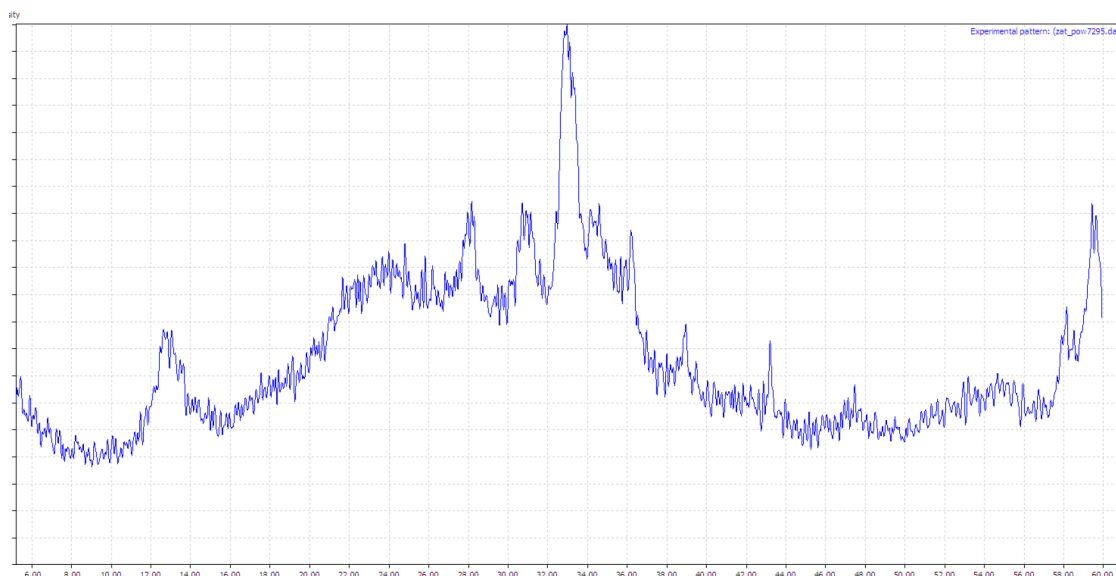


Рис. 6. XRD аналіз комплексоутворення карбамід-наночастинок Zn

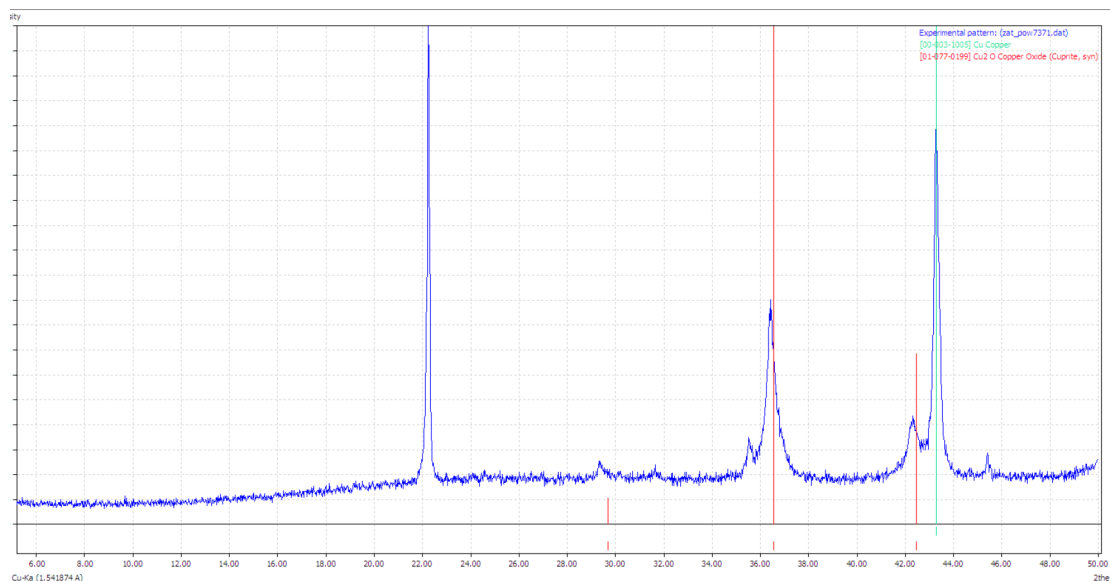


Рис. 7. XRD-аналіз комплексоутворення карбамід-CuHNC

як основної фази. Додатковою фазою є Cu_2O (оксид міді І). Піки $\sim 29.5^\circ$, $\sim 36.4^\circ$, $\sim 42.3^\circ$ (2θ) – характерні для Cu_2O . Фон рівний – свідчить про низький вміст аморфної органіки (карбаміду) або її наявність тільки як тонкий стабілізаційний шар. Всі піки вузькі, отже наночастинки мають високий ступінь впорядкованості. Присутні також домішки Cu_2O , що є ознакою легкого поверхневого окиснення, типовий ефект при стабілізації карбамідом. За формулою Шерера розміри складають 20–40 нм.

Нижче на рис. 7 наведено XRD-спектр наночастинок заліза (Fe):

Найсильніші піки $\sim 44.7^\circ$, 65.0° (2θ), що відповідають площинам **(110)** та **(200)** для

металевого Fe^0 (α -фаза). Збігаються з еталоном 01-087-2396. Отже, основна фаза – металічне залізо. Піки $\sim 30.1^\circ$, 35.5° , 43.1° , 57.0° (2θ) характерні для Fe_3O_4 (магнетит), тому присутня домішка магнетиту. Також слабкі піки $\sim 33^\circ$, $\sim 49.4^\circ$ (2θ), що відповідають Fe_2O_3 (гематиту). Оскільки інтенсивність мала, то гематит у незначній кількості або на поверхні. У спектрі спостерігаються незначні відхилення від класичних положень піків гематиту чи магнетиту. Це свідчить про дисторсію кристалічної решітки, спричинену зв'язуванням з лігандом, тобто утворенням поверхневих комплексів (наприклад, $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}$ або $\text{Fe}-\text{NH}_2$). Також Ширина піків збільшена (особливо в зоні

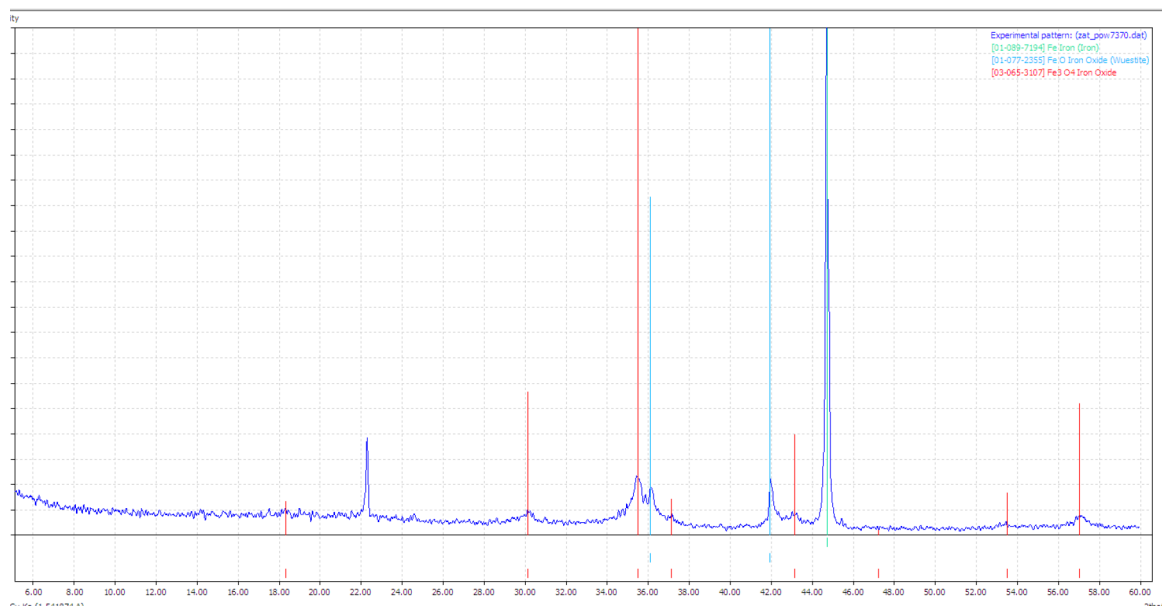


Рис. 8. XRD спектри комплексоутворення карбаміду з Fe HNC

30–40°). Це вказує на неоднорідну координацію Fe^{3+} і Fe^{2+} з органічними молекулами — типовий ефект для Fe—O—C—NH_2 комплексів.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отже, хімічна природа металу суттєво впливає на ступінь його взаємодії з карбамідом. Залізо зберігає металеву структуру з незначним впливом стабілізатора. Цинк утворює менші наночастинки із середньою силою комплексоутворення. Мідь проявляє найвищу здатність до координаційної взаємодії, утворюючи стійкі комплекси, що потенційно покращує стабільність та функціональні властивості таких наночастинок у агрохімічних або каталізаторних застосуваннях.

Рентгенограми засвідчили збереження основної кристалічної структури в усіх зразках після модифікації. У зразку Fe urea домінує металева фаза $\alpha\text{-Fe}$, водночас виявлено домішки Fe_3O_4 та Fe_2O_3 , що свідчить про часткове поверхнєве окиснення. Помірне розширення піків та зниження інтенсивності сигналів Fe_3O_4 свідчать про деформацію кристалічної решітки внаслідок слабкої взаємодії з молекулами карбаміду.

Зразок Zn urea характеризується широкими та низькоінтенсивними піками, що відповідають гексагональній фазі ZnO. Значна ширина піків у діапазоні 30–36° (2 θ) вказує на нанокристалічну структуру з розмірами доменів 10–20 нм. Підвищений фоновий сигнал свідчить про наявність аморфного органічного шару – залишків карбаміду.

У зразку Cu urea зберігається висока кристалічність металічної міді (Cu^0), підтверджена вузькими та інтенсивними піками. Слабкі сигнали Cu_2O вказують на часткове окиснення. Розмір кристалітів для Fe urea і Cu urea становить 29–34 нм, тоді як у ZnCN спостерігається найменший розмір частинок.

Результати FTIR спектроскопії підтверджують утворення координаційних зв'язків між металами та функціональними групами карбаміду. У всіх зразках виявлені характерні смуги поглинання, що відповідають вібраціям NH_2 та C=O .

У Fe urea спостерігаються лише незначні зсуви смуг, що вказує на слабку взаємодію заліза з карбамідом, ймовірно через поверхнєву адсорбцію. Для Zn urea зафіксовано помітні зміщення в ділянках C=O та NH_2 , що свідчить про утворення координаційних зв'язків Zn—O—C—NH_2 . У зразку Cu urea фіксуються найбільш інтенсивні та структуровані смуги нижче 1000 cm^{-1} , які відповідають зв'язкам Cu—N і Cu—O , що є прямим свідченням сильного комплексоутворення.

Перспективи подальших досліджень. Результати проведеного дослідження відкривають низку перспективних напрямів для подальшої наукової роботи. Насамперед доцільним є розширення спектру досліджуваних наночастинок шляхом включення до аналізу інших перехідних металів, що мають біологічну активність або каталізаторні властивості. Перспективним є також вивчення впливу різних типів стабілізаторів (зокрема природного походження) на комплексоутворення та колоїдну стабільність наночастинок у водному середовищі.

Окрему увагу слід приділити біоекспериментальним дослідженням щодо фітотоксичності, проникності та транспорту стабілізованих наночастинок у модельних рослинних або клітинних системах. Це дозволить оцінити практичний потенціал отриманих комплексів у сфері агрохімії, біомедицини та екотехнологій.

Подальше використання комп'ютерного моделювання (DFT, молекулярна динаміка) для прогнозування енергетично сприятливих конфігурацій комплексів металів з карбамідом може доповнити експериментальні дані й сприяти глибшому розумінню механізмів комплексоутворення.

Загалом, перспективи досліджень полягають у створенні функціоналізованих наноструктур із заданими властивостями, що матимуть високу стабільність, біосумісність та ефективність для застосування у високотехнологічних галузях.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Shahrekizad M., Ahangar A. G., Mir N. EDTA-Coated Fe_3O_4 Nanoparticles: a Novel Biocompatible Fertilizer for Improving Agronomic Traits of Sunflower (*Helianthus Annuus*). *Journal of Nanostructures*. 2015. Vol. 5. P. 117–127.
2. Yu M., Yao J., Liang J., Zeng Z., Cui B., Zhao X., Sun C., Wang Y., Liu G., Cui H. Development of functionalized abamectin poly(lactic acid) nanoparticles with regulatable adhesion to enhance foliar retention. *RSC Advances*. 2017. Vol. 7, No. 19. P. 11271–11280.

3. Kolencik M., Ernst D., Urik M., Durisova L., Bujdos M., Sebesta M., Dobrocka E., Ksinan S., Illa R., Qian Y., Feng H., Cerny I., Holisova V., Kratosova G. Foliar Application of Low Concentrations of Titanium Dioxide and Zinc Oxide Nanoparticles to the Common Sunflower under Field Conditions. *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, No. 8. P. 1619.
4. Jurkow R., Pokluda R., Sekara A., Kalisz A. Impact of foliar application of some metal nanoparticles on antioxidant system in oakleaf lettuce seedlings. *BMC Plant Biology*. 2020. Vol. 20, No. 1. P. 290.
5. Wu J., Wang G., Vijver M. G., Bosker T., Peijnenburg W. Foliar versus root exposure of AgNPs to lettuce: Phytotoxicity, antioxidant responses and internal translocation. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 261. P. 114117.
6. El Amerany F., Meddich A., Wahbi S., Porzel A., Taourirte M., Rhazi M., Hause B. Foliar Application of Chitosan Increases Tomato Growth and Influences Mycorrhization and Expression of Endochitinase-Encoding Genes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No. 2. P. 1–18.
7. Нанотехнологія у ветеринарній медицині / [В. Б. Борисевич, Б. В. Борисевич, В. Г. Каплуненко та ін.]. Київ : ТОВ «Наноматеріали і нанотехнології», 2009. 232 с.
8. Спосіб отримання колоїдних металевих наночастинок «Ерозійно-вибухове отримання колоїдних металевих наночастинок» : пат. на корисну модель № 29450 Україна, МПК (2006) B01 J13/00 / М. В. Косінов, В. Г. Каплуненко ; заявл. 03.10.2007 ; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1.

REFERENCES:

1. Shahrekizad, M., Ahangar, A. G., & Mir, N. (2015). EDTA-Coated Fe₃O₄ Nanoparticles: a Novel Biocompatible Fertilizer for Improving Agronomic Traits of Sunflower (*Helianthus Annuus*). *Journal of Nanostructures*, 5, 117–127.
2. Yu, M., Yao, J., Liang, J., Zeng, Z., Cui, B., Zhao, X., Sun, C., Wang, Y., Liu, G., & Cui, H. (2017). Development of functionalized abamectin poly(lactic acid) nanoparticles with regulatable adhesion to enhance foliar retention. *RSC Advances*, 7(19), 11271–11280.
3. Kolencik, M., Ernst, D., Urik, M., Durisova, L., Bujdos, M., Sebesta, M., Dobrocka, E., Ksinan, S., Illa, R., Qian, Y., Feng, H., Cerny, I., Holisova, V., & Kratosova, G. (2020). Foliar Application of Low Concentrations of Titanium Dioxide and Zinc Oxide Nanoparticles to the Common Sunflower under Field Conditions. *Nanomaterials*, 10(8), 1619.
4. Jurkow, R., Pokluda, R., Sekara, A., & Kalisz, A. (2020). Impact of foliar application of some metal nanoparticles on antioxidant system in oakleaf lettuce seedlings. *BMC Plant Biology*, 20(1), 290.
5. Wu, J., Wang, G., Vijver, M. G., Bosker, T., & Peijnenburg, W. (2020). Foliar versus root exposure of AgNPs to lettuce: Phytotoxicity, antioxidant responses and internal translocation. *Environmental Pollution*, 261, 114117.
6. El Amerany, F., Meddich, A., Wahbi, S., Porzel, A., Taourirte, M., Rhazi, M., & Hause, B. (2020). Foliar Application of Chitosan Increases Tomato Growth and Influences Mycorrhization and Expression of Endochitinase-Encoding Genes. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(2), 1–18.
7. Borisevych, V. B., Borisevych, B. V., Kaplunenko, V. H. та ін. (2009). *Nanotekhnolohiia u veterynarnii medytsyni* [Nanotechnology in veterinary medicine]. Kyiv : TOV “Nanomaterialy i nanotekhnolohii”. [in Ukrainian]
8. Kosinov, M. V., & Kaplunenko, V. H. (2008). *Sposib otrymannia koloidnykh metalevykh nanochastynok* “Eroziino-vybukhove otrymannia koloidnykh metalevykh nanochastynok” [Method for producing colloidal metal nanoparticles “Erosive-explosive synthesis of colloidal metal nanoparticles”]: Patent of Ukraine, No. 29450. Claimed: 03.10.2007; Published: 10.01.2008, Bulletin No. 1. [in Ukrainian].

ЕКОЛОГІЯ

УДК 551.583 : 556.53 (477.82)

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-11>

Ірина НЕТРОБЧУК

кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної географії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-8633-7426

Марія БОЯРИН

кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0001-9822-5897

Богдан ЖДАНЮК

кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій, Відокремлений структурний підрозділ закладу вищої освіти «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна» Дубенська філія, вул. Шевченка, 14, м. Дубно, Рівненська обл., Україна, 35600

ORCID: 0000-0002-0171-3825

Бібліографічний опис статті: Нетробчук І., Боярин, М., Жданюк, Б. (2025). Вплив кліматичних змін на водний режим річки Стир у Волинській області. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 84–94, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-11>

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ВОДНИЙ РЕЖИМ РІЧКИ СТИР У ВОЛИНСЬКІЙ ОБЛАСТІ

В статті розглядається аналіз впливу кліматичних змін на водний режим р. Стир у Волинській області. Адже в умовах подальших змін клімату погіршуватимуться умови природного вологозабезпечення, що негативно впливатимуть на гідрологічний режим водойм. У порівнянні з показниками минулого століття фіксується значне зменшення об'ємів річного річкового стоку, рівень води у річках України упродовж літнього періоду вже декілька років є нижчим за норму.

Річна середня температура повітря у 2022–2023 рр. становила 9,4 і 10,4 °С відповідно, що на 0,9 і 1,9 °С вище норми (8,5°). Спостерігалась тенденція до підвищення значень середньомісячних температур, що відповідає світовим тенденціям. Річна кількість опадів була вищою у 2022 р. і становила 736 мм, у 2023 р. – 680 мм. Отже, простежується деяке збільшення опадів узимку, влітку та восени.

Найвищі рівні води були зафіксовані у 2023 р., в якому середній рівень води становив 348 см, у 2022 р. – 316 см. Максимальні рівні спостерігали весною, а мінімальні – влітку та восени. За спостережуваний період спостерігалась тенденція щодо зменшення середньомісячних та річних витрат води від 24,8 до 29,8 м³/с (2022–2023 рр.) порівняно із 2006–2013 рр., де значення середньорічної витрати води коливалось в межах від 40,1 до 51,2 м³/с.

Встановлено тісний кореляційний зв'язок між витратами води і рівнями води. Крім того, встановлено середній і сильний зв'язок між температурою води, повітря і витратами води; слабкий зв'язок між опадами та витратами і рівнем води.

Підвищення температури взимку спричинило зміни у водному режимі річки, зокрема відсутність снігового покриву, розтягнення водопілля у часі, що призводить до зменшення витрат води, а також відсутності льодового покриву.

Аналіз водного режиму дає можливість раціонально використовувати воду у господарській діяльності та здійснювати збалансоване управління водними ресурсами у басейні р. Стир.

Ключові слова: водний режим, річка, рівні води, витрата води, температура повітря, опади, кліматичні зміни, паводки.

Iryna NETROBCHUK

PhD of Geography, Docent, Associate Professor at the Department of Physical Geography, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-8633-7426

Mariia BOIARYN

PhD of Geography, Docent, Associate Professor at the Department of Ecology and Protection of Environment, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0001-9822-5897

Bohdan ZHDANIUK

PhD of Geography, Associate Professor at the Department of Information and Computer Technologies, Separate Structural Subdivision of Higher Education Institution «Open International University of Human Development «Ukraine» Dubno Branch, 14 Shevchenko str., Dubno, Rivne region, Ukraine, 35600

ORCID: 0000-0002-0171-3825

To cite this article: Netrobchuk, I., Boiaryn, M., Zhdaniuk B. (2025). Vplyv klimatychnykh zmin na vodnyi rezhym richky Styr u Volynskii oblasti [The impact of climate change on the water regime of the river Styr in Volyn region]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 84–94, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-11>

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE WATER REGIME OF THE RIVER STYR IN VOLYN REGION

The article analyses the impact of climate change on the water regime of the Styr River in Volyn region. Under the conditions of further climate change, the conditions of natural moisture supply will deteriorate, which will negatively affect the hydrological regime of water bodies. Compared to the last century, there has been a significant increase in the volume of annual river runoff, and water levels in Ukrainian rivers have been below normal for several years. Rising temperatures and changes in the moisture regime, if projected negatively, could lead to further transformation of river flows, deterioration of water quality and, consequently, problems with water supply and availability in certain regions.

The annual average air temperature in 2022–2023 was 9.4 and 10.4 °C, respectively, which is 0.9 and 1.9 °C above the norm (8.5 °C). The year 2023 was the first in the ranking of the warmest years on record in Lutsk. No negative temperatures were recorded in winter. There was an upward trend in average monthly temperatures, which is in line with global trends. The water temperature was higher than the air temperature in all months. However, as winter temperatures rise, both the period with ice phenomena and the duration of the ice-freeze-up are shrinking. Recently, the probability of ice-free conditions has increased significantly. The annual precipitation was higher in 2022, amounting to 736 mm, and 680 mm in 2023. The increase in winter air temperature contributes to changes in precipitation patterns, with a greater proportion of mixed and liquid precipitation, more frequent thaws, and therefore insufficient snow accumulation to form high water floods. This trend of lack of stable snow cover has been observed in recent years.

The highest water levels were recorded in 2023, when the average water level was 348 cm, and in 2022 – 316 cm. Maximum levels were observed in spring and minimum levels in summer and autumn. During the observed period, there was a tendency to decrease the average monthly and annual water consumption from 24.8 to 29.8 m³/c (2022–2023) compared to 2006–2013, when the average annual water consumption ranged from 40.1 to 51.2 m³/c. A close correlation between water flows and water levels has been established.

In addition, there is a medium to strong correlation between water and air temperature and water discharge; a weak correlation between precipitation and water discharge and water levels.

The increase in winter temperatures has caused changes in the river's water regime, including the absence of snow cover, the extension of the floods over time, which leads to a decrease in water flow, and the absence of ice cover.

The analysis of the water regime makes it possible to use water rationally in economic activities and to carry out balanced water management in the Styr River basin.

Key words: water regime, river, water levels, water flow, air temperature, precipitation, climate change, floods.

Актуальність проблеми. Період від кінця ХХ-го століття і до сьогодні є найтеплішим за всю історію метеорологічних спостережень як в Україні загалом, так і у Волинській області

зокрема. Насамперед варто відзначити, що найважливішою ознакою змін клімату є середня річна температура повітря, яка з початку ХХ століття в Україні зросла більш ніж на 2 °C,

в т. ч. і на 1,2 °C – за останні 30 років. До того ж в умовах подальших змін клімату погіршуватимуться умови природного волого-забезпечення, що негативно впливатимуть на гідрологічний режим водойм. Так, у порівнянні з показниками минулого століття фіксується значне зменшення об'ємів річного річкового стоку, рівень води у річках України упродовж літнього періоду вже декілька років є нижчим за норму (Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України, 2021; Tessema N., 2021).

Зростання температури та зміна режиму зволоження за негативним прогнозом може призвести до подальшої трансформації стоку річок, погіршення екологічної якості вод і, відповідно, до проблем водозабезпечення й доступності водних ресурсів у окремих регіонах. Така ситуація надалі буде прогресувати. За інтегральними підрахунками, упродовж найближчих 15–20 р. кількість доступних водних ресурсів у нашій країні може зменшитися втричі (Мальований М., 2023). Відтак регіональні дослідження змін клімату на водний режим річок є актуальними і своєчасними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Вперше на проблему змін клімату в Україні звернули увагу видатні метеорологи І. Є. Бучинський (1960-ті р.), К. Т. Логвінов (1980-ті р.) (Гребінь В., 2010). Динаміку температури повітря в Україні в сучасних умовах досліджували провідні вчені-фахівці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту та Гідрометцентру України: В. М. Бабіченко, В. І. Осадчий, Н. В. Ніколаєва, Л. М. Гущина, З. С. Бондаренко (Бабіченко В., 2007; 2010; Осадчий В., 2013; Як змінюється клімат в Україні). Сучасний стан режиму опадів в Україні як наслідок зміни клімату вивчали М. Б. Барабаш, О. Г. Татарчук, Н. П. Гребенюк, Т. В. Корж (Барабаш М., 2007). Регіональні дослідження сучасного клімату, зокрема Волинської області, представлені в роботах Т. С. Павловської (2021), Н. А. Тарасюк (2017).

На сьогодні вже спостерігається тенденція того, що кліматичні зміни значно впливають на гідрологічний режим річок. До таких висновків дійшли такі українські вчені, як В. І. Вишневський, В. О. Балабух, Є. Д. Гопченко, Г. В. Больбот, В. В. Гребінь, Б. В. Кіндюк, Н. С. Лобода, О. І. Лук'янець, О. Г. Ободовський, С. І. Сніжко, В. О. Войцехович, Л. І. Лузан (Больбот Г.,

2019; Вишневський В., 2022; Лобода Н., 2014; Мельник Ю., 2011). Сучасний водний режим річок України в умовах змін клімату розглянуто в роботі В. В. Гребеня (2010). Аналізу сучасних змін клімату та їх впливу на річковий стік, льодовий режим річок України присвячені дослідження В. І. Вишневського (2022). Вплив кліматичних змін на водний режим річок Волинської області проаналізовано в науковій праці М. С. Мальований, М. В. Боярин та ін. (2023). Вивченням структури гідрографічної мережі басейну р. Стир, аналізом сучасного гідрологічного режиму за 2020–2022 роки та його впливом на гідрохімічний режим займалася В. Ю. Стельмах (2024). В цій роботі проаналізовано рівневий режим, середні, максимальні, мінімальні витрати води за три роки 2020–2022 рр. Відтак виникла необхідність дослідження впливу метеорологічних показників на водний режим р. Стир, що є важливим в сучасних умовах кліматичних змін та набувають особливої актуальності.

Окрім того, значна увага приділялась вченими багатьох країн світу щодо вивченості питання впливу кліматичних змін на водні ресурси та водний режим річок. Зокрема, це висвітлено в працях Т. Barnett, R. Malone, M. Stone, D. Schindler, P. Whitfield, D. Kingston, Z. Kaezmarek тощо (Гребінь В., 2010; Reshmidevi T., 2018).

Отже, огляд сучасних публікацій стосовно змін клімату засвідчує, що Україна, як й інші європейські країни, також зазнає цих змін, які в подальшому будуть лише посилюватись.

Мета дослідження – проаналізувати показники температури повітря, кількості опадів та оцінити вплив змін клімату на водний режим річки Стир у Волинській області за 2022–2023 рр.

Матеріали та методи дослідження Для аналізу метеорологічних величин – температура повітря та води, кількість опадів, а також елементів водного режиму – рівні води та витрат води були використані дані відділу синоптичної метеорології та гідрології Волинського обласного центру з гідрометеорології за 2022–2023 рр. Для дослідження використано статистичний аналіз, графічний метод, який виконаний в стандартній обчислювальній програмі «Excel 2007».

Виклад основного матеріалу дослідження. Річка Стир є правою притокою р. Прип'ять,

що бере початок на північних схилах Подільської височини, у межах заболоченої балки біля с. Пониква Бродівського району Львівської області. Стир протікає Львівською, Волинською і Рівненською областями (територія Волинської височини та Поліської низовини), після чого перетинає межу з Брестською областю Білорусі, де двома рукавами впадає у р. Прип'ять (басейн Дніпра). Довжина річки на території Волинської області становить 175 км. Площа басейну сягає 13 000 км², з них 7200 м² охоплює ділянку Стир–Луцьк. До річки Стир прилягають багато меліоративних каналів, а також водойми природного та штучного походження й болота. Ґрунтовне дослідження басейну р. Стир знаходимо в роботі (Ганущак М., 2019).

Головними чинниками, що визначають формування гідрологічного режиму річок, є, безперечно, клімат і геолого-геоморфологічна будова. Вторинною, або похідною, є ґрунтова-рослинна основа, яка в статті не розглядається (Гребінь В., 2010). Отож важлива роль у формуванні водного режиму, хімічного складу та якості води належить кліматичним показникам, насамперед, це атмосферним опадам, температурі повітря й води. Загалом клімат басейну р. Стир помірний, вологий, з м'якою зимою, нестійкими морозами, частими відлигами, спекотним літом і значними опадами. Переважають західні вітри з швидкістю 2–3 м/с.

Найважливішою ознакою змін клімату є зміни середньорічної температури повітря. Аналіз даних середньомісячної температури повітря за 2022–2023 рр. показав, що річна середня температура повітря відповідно становила 9,4 і 10,4 °С, що на 0,9 і 1,9 °С вище норми (8,5°).

Вищі показники температури повітря фіксувались у 2023 р. порівняно з 2022 р. (рис. 1). Цей рік став першим у рейтингу найтепліших за час проведення спостережень у м. Луцьку. В ньому не було зафіксовано від'ємних температур узимку. Найхолоднішими місяцями були січень (–0,4 °С) та грудень (–0,3 °С) у 2022 р. Найтеплішим місяцем став серпень (21,1° і 21,9 °С) у 2022–2023 рр., що на 2,1 і 2,9 °С вище норми (19°). Вересень 2023 р., із середньомісячною температурою +18,1 °С, яка відповідала кліматичним показникам червня, став найтеплішим вереснем у Луцьку з 1947 р. Отже, за досліджуваний період спостерігалась тенденція до підвищення значень середньомісячних температур, що відповідає і світовим тенденціям.

Як зазначалось вище, важлива роль також належить температурі води, яку вимірюють на гідрологічних постах. Для її аналізу використано дані гідрологічного поста р. Стир – м. Луцьк. Аналіз літературних джерел показав, що значення температури води в Україні за останні три десятиліття стали помітно вищими в усі місяці року, ніж було до цього (Вишневський В., 2022).

Загалом ці зміни подібні до змін температури повітря. З рис. 2 видно, що значення температури води у 2022 р. у всіх місяцях є вищими від температури повітря. Найвища температура води 26,4 °С була зафіксована 05.07.22 р.

Подібна ситуація з температурою води тільки з вищими значеннями у всіх місяцях спостерігалась у 2023 р., оскільки цей рік був найтеплішим за значеннями температури повітря. Отже, існує тісний взаємозв'язок між температурою повітря і води. Перевищення температури води

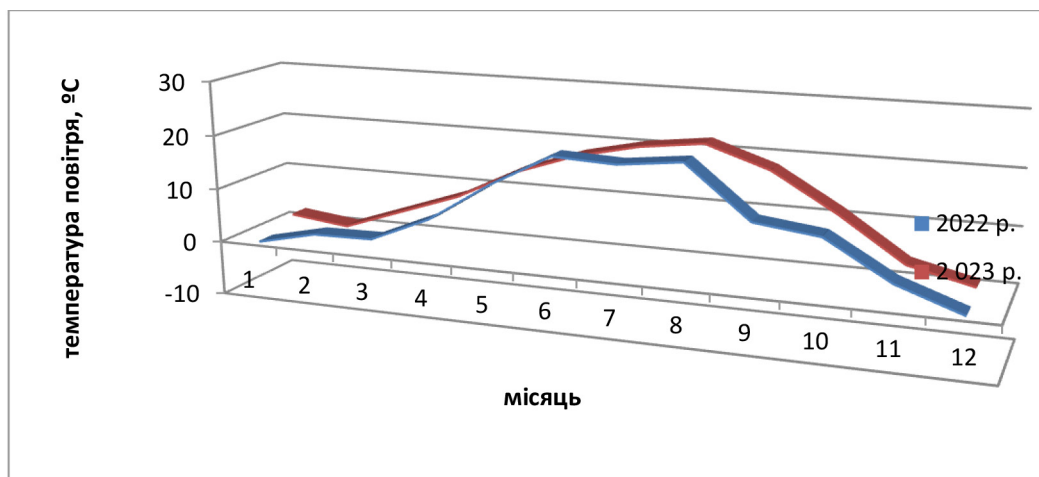


Рис. 1. Середньомісячна температура повітря на метеостанції Луцьк за 2022–2023 рр.

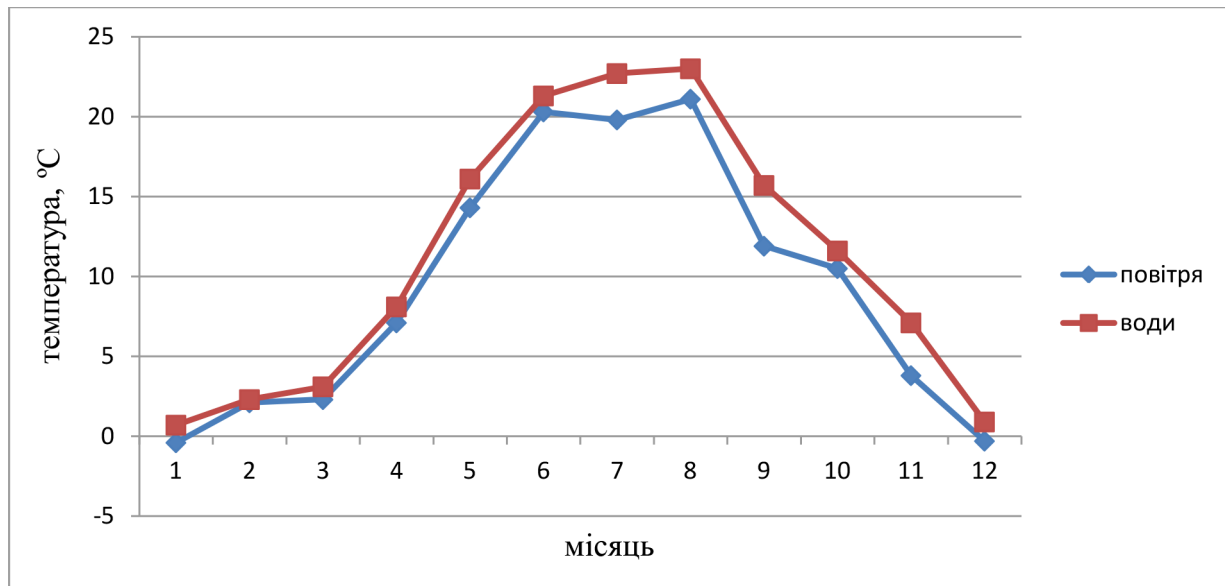


Рис. 2. Середньомісячна температура повітря та води за 2022 р.

над температурою повітря зумовлено тим, що основне поглинання енергії сонця відбувається верхнім шаром води, де вимірюють температуру води.

Варто зауважити, що значення температури повітря нижче 0 °C сприяють формуванню льодових явищ. Однак в умовах підвищення зимової температури повітря скорочується як період з льодовими явищами, так і тривалість льодоставу. Останнім часом істотно зросла ймовірність відсутності льоду. Так, з рис. 2 видно, що зимові середньомісячні температури повітря були вищими за 0 °C у 2023 р. та трохи нижчими на (-0,3; -0,4 °C) у грудні-січні 2022 р, що засвідчує про відсутність льодоставу на річках. Це вказує на кліматичні зміни, які безпосередньо впливають на гідрологічний режим річки.

Важливу роль у формуванні водного режиму відіграють атмосферні опади. Аналіз отриманих даних показав, що найбільше опадів випало у вересні (134 мм) 2022 р. при середній багаторічній місячній нормі 54 мм, що пов'язано із зниженням температури (11,9 °C) та пануванням циклонічної діяльності (рис. 3).

Окрім того, влітку спостерігалось збільшення кількості опадів у липні-серпні, що становило 122 і 103 мм у 2022 р. відносно кліматичної норми (93; 59 мм). Річна кількість опадів була вищою у 2022 р. і становила 736 мм, що на 157 мм вище за норму (579 мм). У 2023 р. фіксувалось 680 мм опадів, що на 101 більше від норми. Отже, у 2022 р. фіксувалися нижчі температури повітря та відповідно випала більша кількість опадів порівняно з 2023 р., в якому

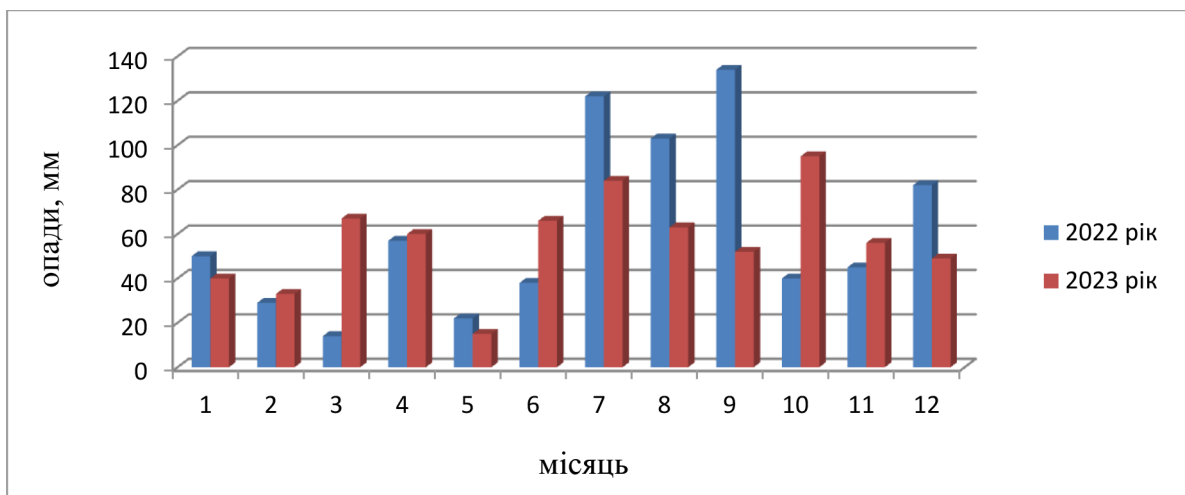


Рис. 3. Місячна кількість опадів на метеостанції Луцьк за 2022–2023 рр.

температури повітря були вищими, а опадів – менше. Також простежується деяке збільшення опадів узимку, влітку та восени (рис. 3).

Підвищення температури повітря взимку сприяє зміні характеру опадів, збільшується частка змішаних та рідких опадів, частішими стають відлиги, а тому не накопичується достатня кількість снігу для формування повноводної повені. Така тенденція щодо відсутності стійкого снігового покриву спостерігається в останні роки.

Отже, в умовах сучасного клімату, кількість опадів за рік не зазнала значних змін. Лише спостерігається деякий їх перерозподіл між сезонами, та нерівномірність випадання в часі.

Основними елементами водного режиму є рівні та витрати води. Коливання рівнів води тісно пов'язані з характером живлення. Як уже згадувалося вище, в останні роки за відсутності снігового покриву, для річок басейну Прип'яті, зокрема р. Стир, на території Волинської області характерним є змішаний тип живлення з переважанням живлення дощами і підземними водами (Мальований М., 2023). Основними фазами водного режиму р. Стир є висока весняна повінь (може проходити у дватри піки через нерівномірне танення снігів або випадання дощів), низька літньо-осіння межень, що майже завжди порушується дощовими паводками та малостійка внаслідок відлиг зимова межень (Ганущак М., 2019; Никонюк У., 2024; Стельмах В., 2024).

Із рис. 4 видно, що середньомісячні рівні води коливалися в межах від 273 см (08.2022 р.) до 460 см (04.2023 р.). Найвищі рівні води були зафіксовані у 2023 р., де середній рівень води становив 348 см, у 2022 р. – 316 см. Проведений аналіз даних засвідчує, що максимальний рівень води (361–345 см) припадав на лютий-березень у 2022 р. та квітень (460 см) у 2023 р. Це пояснювалось значним випаданням змішаних опадів у грудні 2021 р. (69 мм), січні 2022 р. (50 мм) та значною кількістю дощів (82 мм) у грудні 2022 р., березні-квітні 2023 р. (67–60 мм), що спричинило підвищення рівня води в річці (рис. 3). Адже опади, які випали у 2022 р., перевищували не лише місячні норми, а й загалом норму для цього періоду року. Тому сформувалась висока водність. До того ж перед початком опадів територія басейну була перезволоженою, через що не було накопиченого ефекту. Тобто ґрунт не зміг увібрати в себе частину вологи. Мінімальні рівні води (273–286 см) спостерігались у літні місяці 2022 р. та вересні-жовтні (284 см) 2023 р.

Як видно з рис. 4 літню-осінню межень порушили облогові дощі, що спричинили паводки і підняття рівнів води до 293–350 см у вересні-жовтні 2022 р. Упродовж 2022–2023 рр. стійку зимову межень також порушували часті дощі, мокрий сніг, відлиги, формуючи зимові паводки та перешкоджали утворенню сталого льодового покриву.

Витрата води є однією з найголовніших характеристик, що визначає водний режим

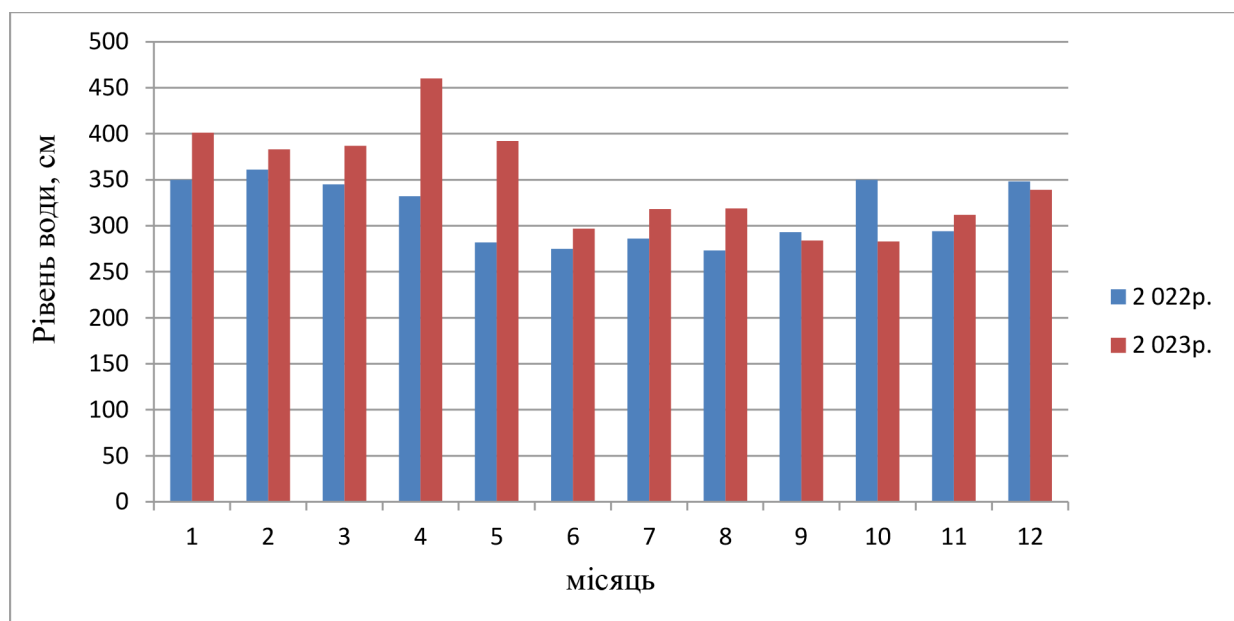


Рис. 4. Середньомісячний рівень води р. Стир за період 2022–2023 рр.

річок. З рис. 5 видно, що вона змінювалась від 8,57 м³/с (08.2022 р.) до 54,9 м³/с (04.2023 р.). Найвищі значення витрат води спостерігались у 2023 р., де середня витрата води сягала 29,8 м³/с, у 2022 р. – 24,8 м³/с. Найбільша витрата води 58,6 м³/с фіксувалась (24.04.2023 р.), найменша – 5,88 м³/с (08.09.2022 р.). Восени витрата води збільшувалась за рахунок атмосферних опадів та сягала 13–28 м³/с.

З огляду на публікацію (Мальований М., 2023), можна стверджувати, що підвищення температури повітря та перерозподіл кількості опадів за період 2006–2020 рр. призвели до змін у середньорічних витратах річок басейну Прип'яті у Волинській області загалом і р.

Стир зокрема. Так, найвищі значення середньорічних витрат води р. Стир спостерігали у 2006–2013 рр. і коливались вони в межах від 40,1 до 51,2 м³/с відповідно, а найнижчі значення – фіксували у 2014–2020 рр. та варіювали від 25,0 до 17,0 м³/с. У 2021 р. середня витрата води становила 24,7 м³/с (Стельмах В., 2024). Отже, спостерігається тенденція щодо зменшення об'ємів середньорічних витрат води на р. Стир за період 2014–2023 рр. порівняно із 2006–2013 рр.

Проаналізувавши значення рівнів та витрат води можна зробити висновок, що між ними існує тісний кореляційний зв'язок. Так, наприклад, у квітні 2023 р. рівень води підвищився

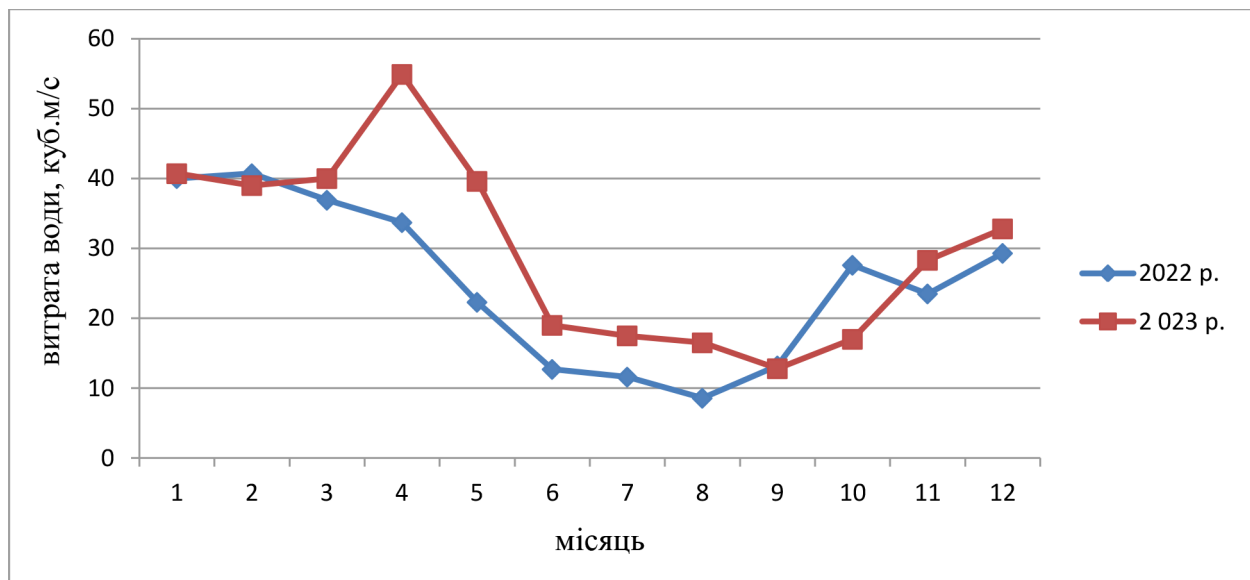


Рис. 5. Середньомісячні витрати води р. Стир за період 2022–2023 рр.

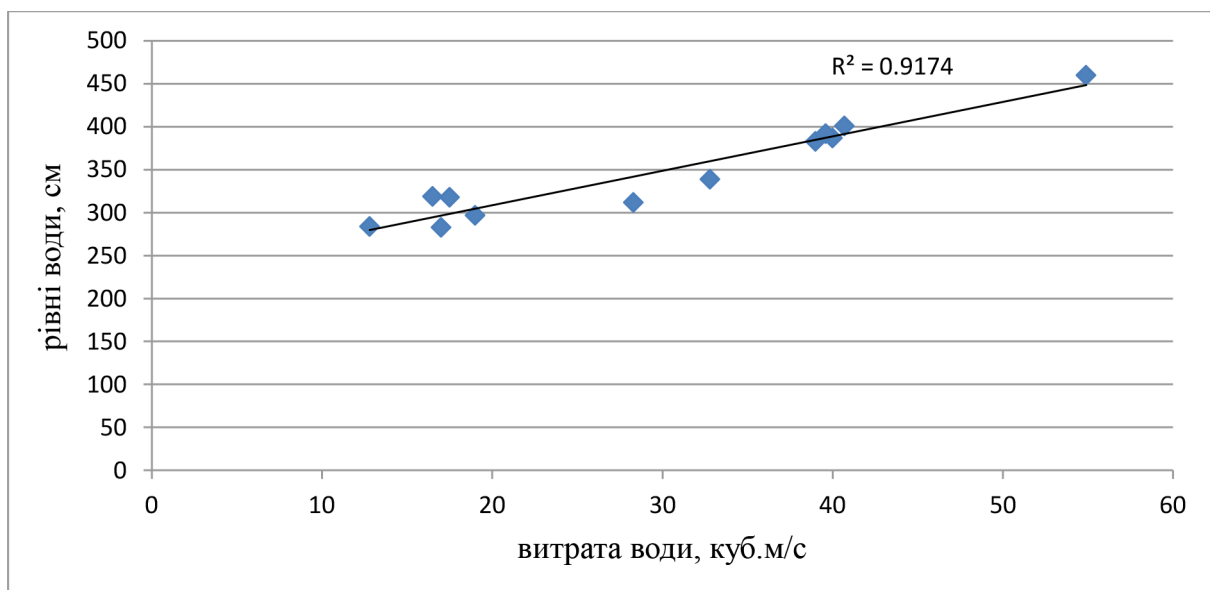


Рис. 6. Крива залежності середніх витрат від рівнів води р. Стир за 2023 р.

до позначки 460 см та відповідно середньомісячна витрата води також збільшилась до 54,9 м³/с, а при зниженні рівня води – зменшується (рис. 6).

Отже, найбільші витрати води зазвичай спостерігалися навесні під час водопілля, яке було зумовлене не таненням снігу, який раніше був основним чинником формування весняної повені, а тривалим випаданням значної кількості дощів взимку 2022 р., що перевищило удвічі місячну норму та весною 2023 р. (рис. 3). Отже, в умовах кліматичних змін в останні роки весняна повінь за джерелом живлення стає більш дощовою, аніж сніговою, менш чітко вираженою (розтягнутою в часі), з відсутністю пікових максимальних витрат.

Проаналізувавши значення температури води, повітря, опадів та рівнів і витрат води, можна встановити певні взаємозв'язки між ними. Певною мірою температура води залежить від водності річки. Так, на рис. 7 бачимо, що із зменшенням витрат води температура води зростає, а при їх збільшенні, вона зменшується. Отже, між ними існує середній зв'язок.

Також можна стверджувати про те, що існує сильний зв'язок між температурою повітря і витратами води (рис. 8). Чим менші витрати води, які припадають на літню межень, тим вища спостерігалася температура повітря та навпаки.

В результаті кореляційного аналізу було з'ясовано, що тіснота зв'язку слабка між опадами та витратами і рівнем води (рис. 9, 10).

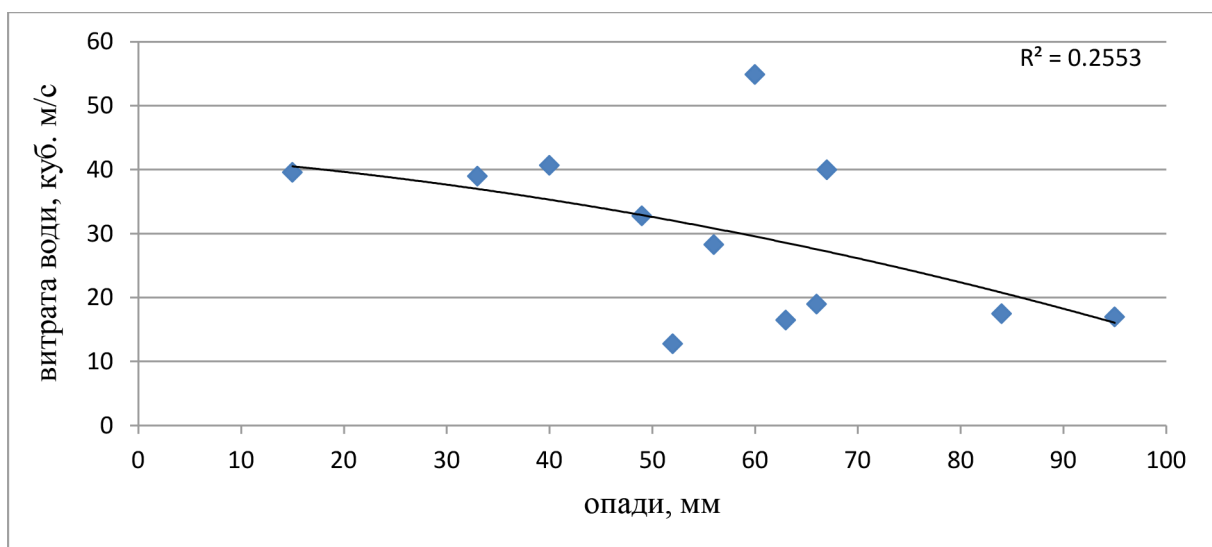


Рис. 7. Залежність температури води від витрат води у р. Стир за 2023 р.

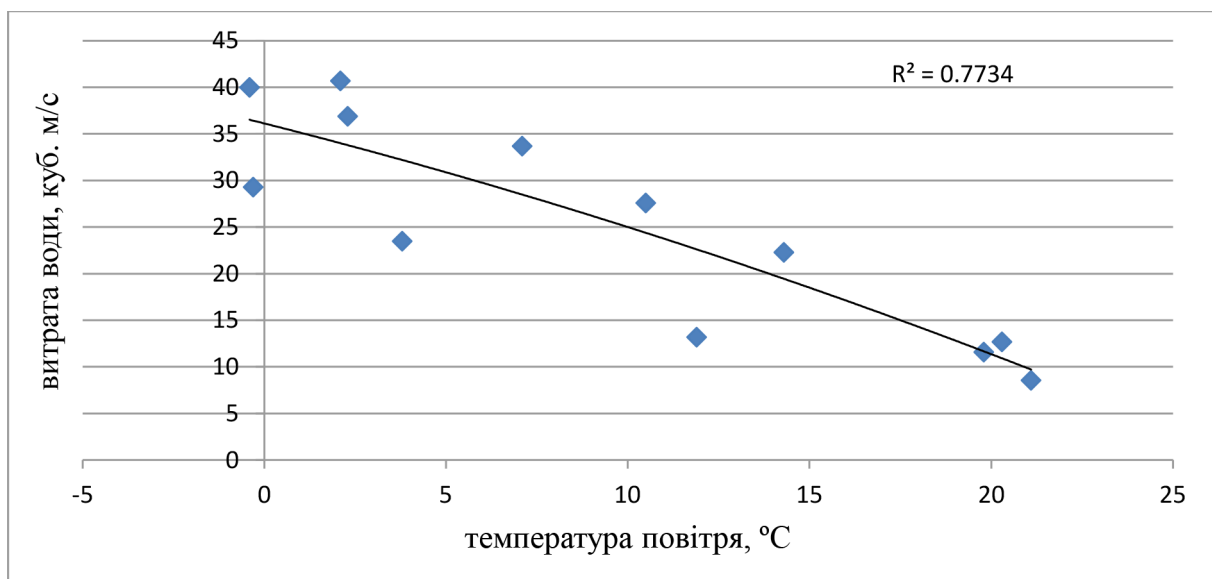


Рис. 8. Зв'язок температури повітря та витрат води у р. Стир за 2022 р.

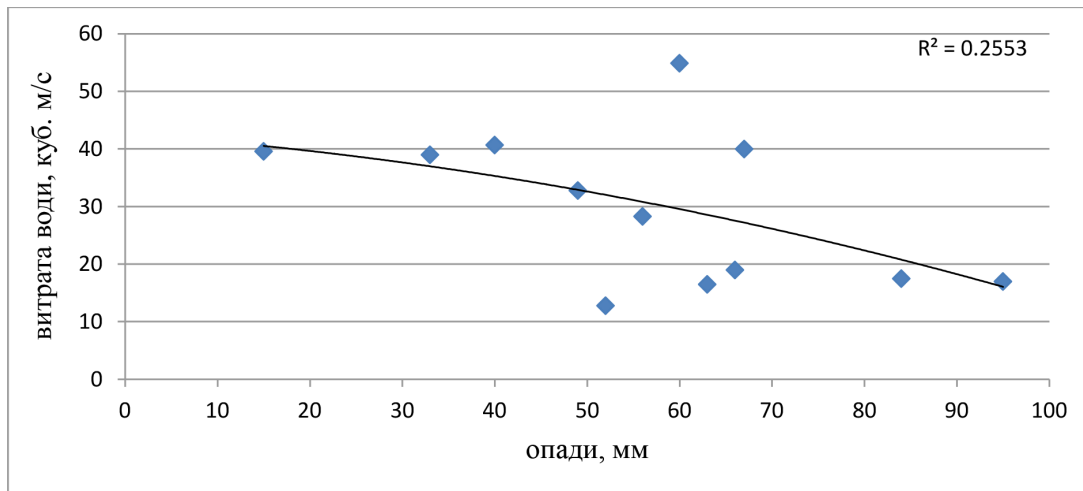


Рис. 9. Зв'язок опадів і витрат води у р. Стир за 2023 р.

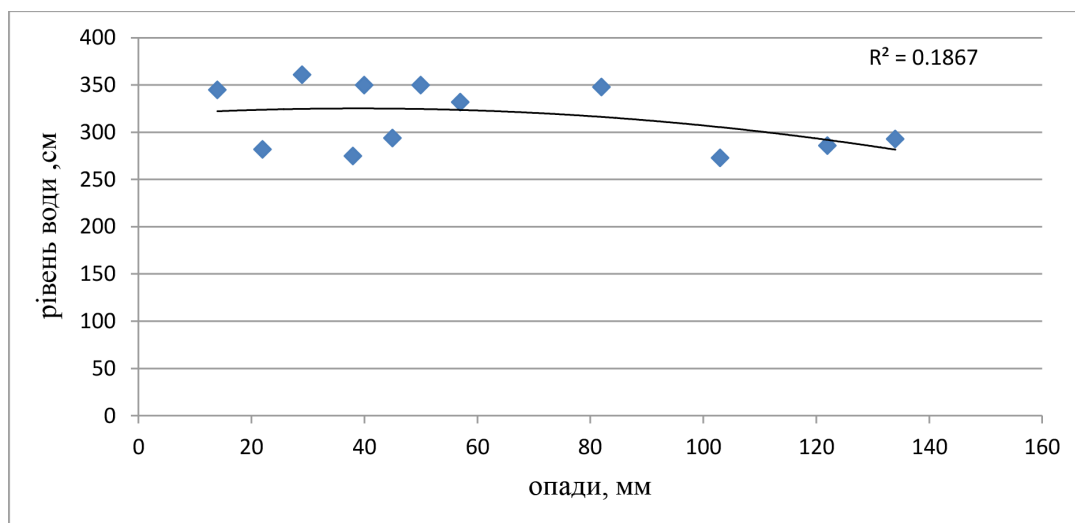


Рис. 10. Зв'язок опадів і рівня води у р. Стир за 2022 р.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отже, проведений аналіз показників температури повітря та води, атмосферних опадів показав, по-перше, що підвищення температури повітря взимку, відсутність снігового покриву, зумовили те, що на р. Стир у Волинській області спостерігалася тенденція щодо зменшення середньомісячних та річних витрат води від 24,8 до 29,8 м³/с (2022–2023 рр.) порівняно із 2006–2013 рр., де значення середньорічної витрати води коливалося в межах від 40,1 до 51,2 м³/с.

По-друге, змінився характер опадів, тобто збільшилась частка змішаних та рідких опадів, що спричиняє зимові паводки, почастишали відлиги, які розтягують водопілля у часі; по-третє, відсутність льодового покриву на річці.

Перспективи використання водного режиму річок є надзвичайно важливими для сталого розвитку. Це дає можливість раціонально використовувати воду у господарській діяльності, здійснювати збалансоване управління водними ресурсами та підвищувати стійкість до негативних наслідків змін клімату у басейні р. Стир.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України (повний звіт за результатами проекту) / Сніжко С., Шевченко О., Дідовець Ю. Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2021, 68 с.
2. Бабіченко В. М., Ніколаєва Н. В., Гущина Л. М. Зміни температури повітря на території України наприкінці ХХ та на початку ХХІ століття. *Український географічний журнал*. 2007. № 4. С. 3–12.
3. Бабіченко В. М., Ніколаєва Н. В., Рудішина С. Ф., Гущина Л. М. Максимальна температура повітря на території України в умовах сучасного клімату. *Український географічний журнал*. 2010. № 3. С. 6–15.

4. Барабаш М. Б., Татарчук О. Г., Гребенюк Н. П., Корж Т. В. Сучасний стан режиму опадів на території України, як наслідок зміни клімату. URL: https://uhmi.org.ua/conf/climate_changes/presentation_pdf/poster_1/Tatarchuk_Grebenuk.pdf (дата звернення 06.11.2024).
5. Ботьот Г. В., Гребін В. В. Аналітичний огляд досліджень впливу змін клімату на стік води річок. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 4(55). С. 64–73. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2019.4.5>
6. Вишневецький В. І., Куций А. В. Багаторічні зміни водного режиму річок України: монографія. Київ : Наукова думка, 2022. 269 с.
7. Ганущак М., Тарасюк Н. Водний чинник в розвитку і функціонуванні природно-антропогенних комплексів басейну річки Стир: монографія. Луцьк : Вежа-Друк, 2019. 236 с.
8. Гребін В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). К. : Ніка-Центр, 2010. 316 с.
9. Лобода Н. С., Сербова З. Ф., Божок Ю. В. Вплив змін клімату на водні ресурси України у сучасних та майбутніх умовах (за сценарієм глобального потепління А1В). *Український гідрометеорологічний журнал*. 2014. Вип. 15. С. 149–159.
10. Мальований М. С., Боярин М. В., Бедункова О. О., Нетробчук І. М., Волошин В. У. Вплив кліматичних змін на водний режим річок Волинської області. *Вісник НУВГП. Серія «Сільськогосподарські науки»*. Випуск 1(101). 2023. С. 150–164. <https://doi.org/10.31713/vs1202311>
11. Мельник Ю. С., Підліснюк В. В., Козловська Т. Ф. Сталість якості водних ресурсів східної України в умовах змін клімату. *Вісник КНУ імені Михайла Остроградського*. Вип. 2 (67). Ч. 1. 2011. С. 127–130.
12. Никонюк У. С., Ногачевський В. В., Павловська Т. С. Внутрішньорічний розподіл водного стоку р. Стир (гідропост Луцьк, 2020 рік). *Universum*. 2024. № 4. С. 242–248.
13. Осадчий В. І., Бабіченко В. М. Температура повітря на території України в сучасних умовах клімату. *Український географічний журнал*. 2013, № 4. С. 32–39.
14. Павловська Т., Мельничук М., Гарасимяк Л. Тривалість й часові рамки метеорологічної весни у Волинській області на початку ХХІ сторіччя. *Rozwój nowoczesnej edukacji i nauki – stan, problemy, perspektywy*. Tom X: *Efekty uczestnictwa w rozwoju nauk i edukacji na odległość* / red.: J. Grzesiak, I. Zymomrya, W. Ilnytskyj. Konin – Uzhorod – Cherson : Poswit, 2021. S. 297–299.
15. Стельмах В. Ю. Аналіз гідрографічної мережі та сучасного гідрологічного режиму р. Стир (2020–2022 рр.). *Український журнал природничих наук*. 2024. № 8. С. 119–130. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.13>
16. Тарасюк Н. А., Тарасюк Ф. П. Регіональні особливості клімату НПП «Прип'ять-Стохід». *Природа Західного Полісся та прилеглих територій*. 2017. № 14. С. 63–69.
17. Як змінюється клімат в Україні. URL: <https://menr.gov.ua/news/35246.html> (дата звернення 01.11.2024).
18. Climate change and water resources, Edited by Brison Bate, Zbignev Kundzevich, Sao Khon Y, Janna Palutikoff, Published by IPCC, 2008. 211 pp.
19. Tessema, N.; Kebede, A.; Yadeta, D. Modelling the effects of climate change on streamflow using climate and hydrological models: The case of the Kesem sub-basin of the Awash River basin, Ethiopia. *Int. J. River Basin Manag.* 2021. 19, 469–480. <https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1755301>
20. Reshmidevi, T. V., Nagesh Kumar, D., Mehrotra, R., Sharma, A. Yongan. Estimation of the climate change impact on a catchment water balance using an ensemble of GCMs. *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 556. P. 1192–1204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.016>

REFERENCES:

1. Analiz vplyvu klimatychnykh zmin na vodni resursy Ukrainy (povnyi zvit za rezultatamy proektu). (2021). [Analysis of the impact of climate change on water resources in Ukraine (full report on the project results)] / Snizhko, S., Shevchenko, O., Didovets, Yu. Tsentr ekolohichnykh initsiatyv “Ekodiia”, 68 s. [in Ukrainian].
2. Babichenko, V. M., Nikolaieva, N. V., Hushchyna, L. M. (2007). Zminy temperatury povitria na terytorii Ukrainy naprykintsi XX ta na pochatku XXI stolittia. [Changes in air temperature in Ukraine in the late 20th and early 21st centuries]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal*. № 4. S. 3–12 [in Ukrainian].
3. Babichenko, V. M., Nikolaieva, N. V., Rudishyna, S. F., Hushchyna, L. M. (2010). Maksymalna temperatura povitria na terytorii Ukrainy v umovakh suchasnoho klimatu. [The maximum air temperature in Ukraine in the current climate]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal*. № 3. S. 6–15 [in Ukrainian].
4. Barabash, M. B., Tatarchuk, O. H., Hrebenuk, N. P., Korzh, T. V. Suchasnyi stan rezhymu opadiv na terytorii Ukrainy, yak naslidok zminy klimatu. [The current state of the precipitation regime in Ukraine as a result of climate change]. Retrieved from: https://uhmi.org.ua/conf/climate_changes/presentation_pdf/poster_1/Tatarchuk_Grebenuk.pdf (data zvernennia 06.11.2024) [in Ukrainian].

5. Bolbot, H. V., Hrebin, V. V. (2019). Analitychnyi ohliad doslidzhen vplyvu zmin klimatu na stik vody richok. [Analytical review of research on the impact of climate change on river flows]. *Hidrolohiia, hidrokhiimiia i hidroekologhiia*. № 4 (55). S. 64–73. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2019.4.5> [in Ukrainian].
6. Vyshnevskiy, V. I., Kutsyi, A. V. (2022). Bahatorichni zminy vodnoho rezhymu richok Ukrainy: monohrafiia. [Long-term changes in the water regime of Ukrainian rivers]. Kyiv: Naukova dumka, 269 s. [in Ukrainian].
7. Hanushchak, M., Tarasiuk, N. (2019). Vodnyi chynnyk v rozvytku i funktsionuvanni pryrodno-antropohennykh kompleksiv basynu richky Styr: monohrafiia. [The water factor in the development and functioning of natural and anthropogenic complexes of the Styr River basin]. Lutsk: Vezha-Druk, 236 s. [in Ukrainian].
8. Hrebin, V. V. (2010). Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrainy (landshaftno-hidrolohichnyi analiz). [Modern water regime of Ukrainian rivers (landscape and hydrological analysis)]. K. : Nika-Tsentr, 316 s. [in Ukrainian].
9. Loboda, N. S., Serbova, Z. F., Bozhok, Yu. V. (2014). Vplyv zmin klimatu na vodni resursy Ukrainy u suchasnykh ta maibutnikh umovakh (za stsennariiem hlobalnoho poteplinnia A1V). [The impact of climate change on water resources in Ukraine in current and future conditions (under the A1B global warming scenario)]. *Ukrainskyi hidrometeorologichnyi zhurnal*. Vyp. 15. S. 149–159 [in Ukrainian].
10. Malovanyi, M. S., Boiaryn, M. V., Biedunkova, O. O., Netrobchuk, I. M., Voloshyn, V. U. (2023). Vplyv klimatychnykh zmin na vodnyi rezhym richok Volynskoi oblasti. [The impact of climate change on the water regime of rivers in the Volyn region]. *Visnyk NUVHP. Seriiia "Silskohospodarski nauky"*. Vypusk 1(101). S. 150–164. <https://doi.org/10.31713/vs1202311> [in Ukrainian].
11. Melnyk, Yu. S., Pidlisniuk, V. V., Kozlovska, T. F. (2011). Stalist yakosti vodnykh resursiv skhidnoi Ukrainy v umovakh zmin klimatu. [Sustainability of water quality in eastern Ukraine in the context of climate change]. *Visnyk KNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. Vyp. 2 (67). Ch. 1. S. 127–130 [in Ukrainian].
12. Nykoniuk, U. S., Nohachevskiy, V. V., Pavlovska, T. S. (2024). Vnutrishnorichnyi rozpodil vodnoho stoku r. Styr (hidropost Lutsk, 2020 rik). [Intra-annual distribution of water flow in the Styr River (gauging station Lutsk, 2020)]. *Universum*. № 4. S. 242–248 [in Ukrainian].
13. Osadchyi, V. I., Babichenko, V. M. (2013). Temperatura povitria na terytorii Ukrainy v suchasnykh umovakh klimatu. [Air temperature on the territory of Ukraine in the current climate conditions]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal*. № 4. S. 32–39 [in Ukrainian].
14. Pavlovska, T., Melnychuk, M., Harasymiak, L. (2021). Tryvalist y chasovi ramky meteorologichnoi vesny u Volynskii oblasti na pochatku KhKhI storichchia. [The duration and timing of the meteorological spring in the Volyn region at the beginning of the twenty-first century]. *Rozwój nowoczesnej edukacji i nauki – stan, problemy, perspektywy*. Tom Kh: Efekty uczestnictwa w rozwoju nauk i edukacji na odległość / red.: J. Grzesiak, I. Zymomrya, W. Ilnytskyj. Konin – Użhorod – Chersoń : Poswit. S. 297–299 [in Ukrainian].
15. Stelmakh, V. Yu. (2024). Analiz hidrografichnoi merezhi ta suchasnogo hidrolohichnoho rezhymu r. Styr (2020–2022 rr.). [Analysis of the hydrographic network and the current hydrological regime of the Styr River (2020–2022)]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychkykh nauk*. № 8. S. 119–130. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.13> [in Ukrainian].
16. Tarasiuk, N. A., Tarasiuk, F. P. (2017). Rehionalni osoblyvosti klimatu NPP "Prypiat-Stokhid". [Regional climate features of the Prypiat-Stokhid NNP]. *Pryroda Zakhidnoho Polissia ta prylehlykh terytorii*. № 14. S. 63–69 [in Ukrainian].
17. Iak zminiuietsia klimat v Ukraini. [How the climate is changing in Ukraine]. URL: <https://menr.gov.ua/news/35246.html> (data zvernennia 01.11.2024) [in Ukrainian].
18. Climate change and water resources, Edited by Brison Bate, Zbignev Kundzevich, Sao Khon Y, Janna Palutikoff, Published by IPCC, 2008. 211 pp.
19. Tessema, N., Kebede, A., Yadeta, D. (2021). Modelling the effects of climate change on streamflow using climate and hydrological models: The case of the Kesem sub-basin of the Awash River basin, Ethiopia. *Int. J. River Basin Manag.* 19, 469–480. <https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1755301>
20. Reshmidevi, T. V., Nagesh Kumar, D., Mehrotra, R., Sharma, A. Yongan. (2018). Estimation of the climate change impact on a catchment water balance using an ensemble of GCMs. *Journal of Hydrology*. Vol. 556. P. 1192–1204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.016>

УДК 630.2:502.131.1

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-12>

Ірина ПАЦЕВА

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0001-6271-7355

Анастасія КАГУКІНА

доктор філософії з екології, асистент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0001-8932-1211

Інна МОЖАРІВСЬКА

кандидат сільськогосподарський наук, доцент кафедри здоров'я природи та якості харчових ресурсів, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0003-0564-4457

Бібліографічний опис статті: Пацева, І., Кагукіна А., Можарівська І. (2025). Наукові підходи до вирішення проблем відновлення лісових екосистем. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 95–101, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-12>

НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ВІДНОВЛЕННЯ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ

У статті розглядаються різноманітні аспекти та підходи, пов'язані з питанням відновлення лісових екосистем у сучасних умовах. Актуальність обраної тематики зумовлена зростаючою увагою наукової та практичної спільноти до необхідності гармонізації природного середовища та забезпечення екологічного балансу. Лісові екосистеми відіграють ключову роль у функціонуванні біосфери, адже саме вони сприяють збереженню кліматичної рівноваги, забезпечують кисневий обмін, регулюють водні ресурси та слугують осередком біологічного різноманіття. Їхнє виснаження або руйнування спричиняє низку серйозних екологічних проблем. Проаналізовано загальні принципи та напрями, які можуть бути використані у процесі відновлення лісових екосистем, з акцентом на багатовимірність і складність взаємодії між природними, соціальними та технологічними елементами. У центрі уваги знаходиться ідея про важливість комплексного бачення, що дозволяє поєднувати традиційні знання з новітніми розробками, створюючи підґрунтя для формування стійких екосистем. Окрему увагу приділено розмаїттю підходів, які можуть бути застосовані залежно від специфіки території, кліматичних умов та інших чинників. Підкреслюється значення цілісного підходу до вирішення проблем, що потребує гнучкості, адаптивності та урахування багатьох змінних. Стаття має на меті узагальнення наявного досвіду та окреслення потенційних шляхів для подальших досліджень у цій сфері, що є важливим кроком до більш глибокого розуміння процесів, які відбуваються у лісових екосистемах. Представлений матеріал може бути корисним для широкого кола фахівців, зацікавлених у питаннях сталого природокористування, охорони довкілля та відновлення природної рівноваги. Результати дослідження мають практичну цінність для розробки національних і регіональних програм відновлення лісів, орієнтованих на довготривалу екологічну стійкість.

Ключові слова: лісові екосистеми, відновлення лісових екосистем, зміна клімату, наукові підходи.

Iryna PATSEVA

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ecology and Environmental Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0001-6271-7355

Anastasiia KAHUKINA

Doctor of Philosophy in Ecology, Lecturer at the Department of Earth Sciences, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0001-8932-1211

Inna MOZHARIVSKA

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Department of Environmental Health and Food Quality, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0003-0564-4457

To cite this article: Patseva, I., Kahukina, A., Mozharivska, I. (2025). Naukovi pidkhody do vyryshennia problem vidnovlennia lisovykh ekosystem [Scientific approaches to solving problems of forest ecosystem restoration]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 95–101, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-12>

SCIENTIFIC APPROACHES TO SOLVING PROBLEMS OF FOREST ECOSYSTEM RESTORATION

The article discusses various aspects and approaches related to the restoration of forest ecosystems in modern conditions. The relevance of the chosen topic is due to the growing attention of the scientific and practical community to the need to harmonise the natural environment and ensure ecological balance. Forest ecosystems play a key role in the functioning of the biosphere, as they contribute to maintaining climate balance, ensure oxygen exchange, regulate water resources and serve as a centre of biodiversity. Their depletion or destruction causes a number of serious environmental problems. The article analyses the general principles and directions that can be used in the process of restoring forest ecosystems, with an emphasis on the multidimensionality and complexity of the interaction between natural, social and technological elements. The focus is on the importance of an integrated vision that combines traditional knowledge with the latest developments, creating the basis for the formation of sustainable ecosystems. Special attention is paid to the variety of approaches that can be applied depending on the specifics of the territory, climatic conditions and other factors. The importance of a holistic approach to problem-solving, which requires flexibility, adaptability and consideration of many variables, is emphasised. The article aims to summarise the existing experience and outline potential avenues for further research in this area, which is an important step towards a deeper understanding of the processes taking place in forest ecosystems. The material presented here can be useful for a wide range of professionals interested in sustainable natural resource management, environmental protection and restoration of natural balance. The results of the study are of practical value for the development of national and regional forest restoration programmes focused on long-term environmental sustainability.

Key words: forest ecosystems, restoration of forest ecosystems, climate change, scientific approaches.

Актуальність проблеми. Відновлення екосистем визнано критично важливим для досягнення прискореного прогресу в досягненні всіх Цілей сталого розвитку Організації Об'єднаних Націй (Rakova & Winter, 2020). Лісові екосистеми відіграють ключову роль у підтримці біосферного балансу планети. Вони забезпечують регуляцію клімату, збереження біорізноманіття, захист ґрунтів та водних ресурсів. Проте за останні десятиліття масштаби деградації лісів значно зросли внаслідок інтенсивного господарювання, зміни клімату та антропогенного тиску. Це зумовлює необхідність комплексного відновлення лісових екосистем, де провідну роль відіграють наукові дослідження та міждисциплінарні підходи. Попередні дослідження підтверджують актуальність проблеми загибелі лісів (Савчук,

Шулипа, 2025; Джам, Дяк, Гулай, Караїм, Лавринюк, 2024; Лавринюк, Войцеховський, Гулай, Караїм, Джам, 2024). Лісові екосистеми є одними з найбільш важливих компонентів біосфери, що забезпечують глобальний баланс кисню, стабілізують клімат, регулюють гідрологічний цикл та підтримують біорізноманіття планети. Деградація лісових екосистем призводить до катастрофічних наслідків: втрати біорізноманіття, ерозії ґрунтів, збільшення концентрації парникових газів в атмосфері (Kahukina, Patseva, 2025; Герасимчук, 2023; Луньова, Кагукіна, 2023) порушення водного балансу та погіршення якості життя місцевих громад. При цьому швидкість відновлення природних лісів значно нижча за темпи їх знищення, що створює загрозу екологічній безпеці цілих регіонів.

В Україні ситуація особливо гостра через інтенсивне лісокористування протягом останніх десятиліть, масштабні незаконні вирубки, зростання частоти лісових пожеж, а також загострення впливу кліматичних змін (Кагукіна, Пацева, 2025; Кагукіна, Пацева, 2024; Пацева, Кагукіна, Луньова, 2023), що проявляється у підвищенні середньорічних температур та частіших посухах. Окрім того, російська військова агресія спричинила додаткові масштабні пошкодження лісових екосистем через бойові дії, пожежі та забруднення.

Відтак, розробка та впровадження ефективних науково обґрунтованих підходів до відновлення лісових екосистем є критично важливим завданням не лише для збереження природного спадку та біорізноманіття, але й для забезпечення сталого екологічного, економічного та соціального розвитку держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кількість лісових пожеж зростатиме зі зростанням температури внаслідок зміни клімату (Pati et al., 2024; Пацева, Кагукіна, 2024; Пацева, Кагукіна, 2023). Сучасні наукові дослідження підтверджують, що лісові екосистеми відіграють критично важливу роль у забезпеченні екологічних, економічних і соціокультурних функцій (Keenan et al., 2015). Зростання частоти лісових пожеж, викликаних як природними, так і антропогенними чинниками (Nyongesa & Vacik, 2018), вимагає впровадження комплексного підходу до відновлення. Актуальні публікації наголошують на важливості інтеграції екологічних, економічних та соціальних аспектів (Stanturf et al., 2014), просторово-статистичному аналізі причин пожеж (Tariq et al., 2021), та участі місцевих громад у відновлювальних заходах (Rakova & Winter, 2020).

Особливу увагу дослідники приділяють традиційним знанням у поєднанні з інноваційними технологіями, зокрема машинним навчанням (Rakova & Winter, 2020). Крім того, вказується на необхідність ревайлдингу, відновлення трофічних ланцюгів і довготривалої стійкості лісових екосистем (Marshall et al., 2023).

Методологічні огляди (Shimamoto et al., 2018; Fernandes & Botelho, 2003) підтверджують ефективність природної регенерації та адаптивного управління, особливо у відновленні після пожеж. Водночас, дослідження (Aerts & Honnay, 2011) підкреслюють значення

екосистемного і спільнотного підходів, які враховують як функціональні, так і біорізноманітні характеристики екосистем.

Таким чином, сучасні наукові підходи базуються на мультидисциплінарному аналізі, що поєднує просторові технології, екологічні знання, участь громад та адаптивне управління.

Метою дослідження є систематизація, аналіз та оцінка сучасних наукових підходів до вирішення проблем відновлення лісових екосистем, визначення їх ефективності та можливостей практичного застосування в умовах України з урахуванням регіональних особливостей, кліматичних змін та антропогенного навантаження. Проаналізовано та систематизовано сучасні наукові підходи до відновлення лісових екосистем. Оцінено потенціал застосування інноваційних технологій у процесах відновлення лісових екосистем. Розроблено рекомендації щодо вдосконалення процесів лісовідновлення.

Виклад основного матеріалу дослідження. У світлі зростаючих екологічних викликів, спричинених змінами клімату, антропогенним тиском та деградацією природного середовища, питання відновлення лісових екосистем набуває особливої актуальності в науковому і практичному дискурсі. Сучасна парадигма екологічного відновлення вже давно перестала обмежуватися виключно біологічним або технологічним відтворенням лісового покриву. Натомість дедалі більше уваги приділяється комплексному, міждисциплінарному підходу, який інтегрує екологічні, економічні, соціокультурні та технологічні аспекти.

Ліси надають численні економічні, екологічні, суспільні культурні переваги, які є прибутками для добробуту людини протягом тривалого розвитку (Keenan et al., 2015). Насамперед, ліс розглядається не лише як джерело ресурсів, а як складна соціоекологічна система, здатна забезпечувати низку екосистемних послуг, включно з регуляцією клімату, збереженням біорізноманіття, захистом ґрунтів і водних ресурсів, а також підтримкою культурних практик і способу життя локальних громад (Keenan et al., 2015). Саме така багатовимірна характеристика лісів вимагає від науковців розробки інноваційних та адаптивних моделей відновлення, що виходять за межі традиційного лісонасадження.

В останні десятиріччя відзначається збільшення частоти та інтенсивності лісових пожеж через природні та антропогенні фактори, що часто спричиняє значних збитків (Nyongesa & Vacik, 2018). Особливої уваги заслуговує інтенсивне зростання кількості та площ лісових пожеж, що обумовлено як природними процесами, так і людською діяльністю (Nyongesa & Vacik, 2018). У цьому контексті важливо впроваджувати підходи, що враховують просторову динаміку, аналізуючи причинно-наслідкові зв'язки між ландшафтними характеристиками та ймовірністю виникнення пожеж. Просторова характеристика розподілу лісових пожеж та їх причин має вирішальне значення для пом'якшення та гасіння лісових загорянь, включаючи запровадження превентивних заходів (Tariq et al., 2021). Відповідно, необхідність просторово-статистичного та геоінформаційного моніторингу стає невід'ємною частиною сучасного підходу до планування заходів з відновлення.

У статті Богдани Ракової та Александра Вінтера обговорюється інтеграція традиційних екологічних знань з сучасними технологіями, такими як машинне навчання, для ефективного відновлення екосистем, автори підкреслюють важливість врахування соціокультурних аспектів та залучення місцевих громад до процесу відновлення (Rakova & Winter, 2020). Таким чином, ще одним перспективним напрямом є інтеграція традиційних екологічних знань із сучасними технологіями, такими як машинне навчання. Поєднання емпіричних знань місцевих громад із точністю обчислювальних методів створює передумови для виникнення нових форм взаємодії людини з природним середовищем, що, у свою чергу, сприяє підвищенню ефективності екологічних проєктів та забезпечує їх довгострокову стійкість.

У роботах (Stanturf et al., 2014; Aerts & Nonnay, 2011) висвітлюється важливість функціонального та структурного підходів до відновлення, де акцент робиться не лише на фізичному відновленні лісового покриву, але й на реінтеграції екологічних функцій, таких як трофічна взаємодія, кругообіг поживних речовин та підтримка ландшафтної мозаїчності.

Збереження та відновлення лісів знаходяться в центрі глобальних зусиль щодо пом'якшення наслідків зміни клімату та запобігання масовому

вимиранню біорізноманіття (Marshall et al., 2023). Відновлення лісових екосистем є важливим напрямом у боротьбі зі зміною клімату та збереженні біорізноманіття. У цьому контексті дана концепція є одним із найпрогресивніших напрямів, що передбачає повернення до екосистемних умов, які існували до значного антропогенного втручання.

Не менш важливим є фактор адаптивного управління в умовах глобальної зміни клімату. Стратегії повинні враховувати як довготривалі екологічні зміни, так і локальні особливості конкретного регіону, включаючи соціально-економічну ситуацію, культурні цінності, рівень обізнаності та участі громад. Це особливо актуально в контексті регіонів, що зазнали значних екологічних втрат через пожежі або інші деструктивні явища (Fernandes & Botelho, 2003; Alayan et al., 2022). У статті, опублікованій у журналі (Fernandes & Botelho, 2003), аналізуються підходи до відновлення лісів після пожеж, включаючи використання контрольованих підпалів для підтримки здоров'я лісових екосистем. Автори підкреслюють важливість адаптивного управління та врахування місцевих умов при плануванні відновлення. Контрольовані підпали можуть сприяти відновленню природних процесів та підтриманню біорізноманіття. У статті (Aerts & Nonnay, 2011), розглядаються два основні підходи до відновлення лісів: спільнотний та екосистемний. Спільнотний підхід фокусується на відновленні структури та біорізноманіття лісових спільнот, використовуючи природні сукцесійні процеси та взаємодії між видами. Екосистемний підхід, натомість, спрямований на відновлення функціональних аспектів екосистем, таких як продуктивність, енергетичні потоки та біогеохімічні цикли. Обидва підходи мають свої переваги та можуть бути ефективними залежно від конкретних умов та цілей відновлення.

Таким чином, наукові підходи до відновлення лісових екосистем у XXI столітті повинні бути багатовекторними, гнучкими, інклюзивними та стійкими до викликів часу. Вони мають базуватися на поєднанні глибоких теоретичних засад із практичними інструментами сучасної науки, екологічної етики та гуманітарного бачення сталого майбутнього.

Сучасні наукові дослідження у сфері відновлення лісових екосистем свідчать про перехід

від традиційних, переважно технократичних методів до інтегрованих, трансдисциплінарних підходів.

Згідно з (Stanturf et al., 2014) та (Aerts & Nonnau, 2011), ефективне відновлення лісів має охоплювати три ключові рівні, оскільки проблеми, з якими стикаються лісові екосистеми, мають комплексний характер, а отже і відповіді на них повинні включати взаємодію різних акторів – від науковців до місцевих жителів. Це вимагає створення відкритих екологічних платформ, де місцева громада та екологи могли б співпрацювати, розробляючи гнучкі сценарії відновлення з урахуванням історичних, культурних та природних умов конкретної місцевості. Цінна ідея поєднання машинного навчання із традиційними екологічними знаннями (Rakova & Winter, 2020) розширює межі ефективного аналізу даних, а й підсилює соціальну складову відновлення – залучення громад дає змогу зробити процес не тільки технологічно обґрунтованим, а й соціально легітимним.

Майбутнє лісового відновлення – за інтерактивними, адаптивними моделями, які враховують не лише дані з дронів чи супутників, а й голоси старійшин, лісників, фермерів, які десятиліттями спостерігали за місцевими екосистемами.

Пожежі стають глобальним викликом, а не лише регіональною проблемою. У цьому контексті дослідження (Nyongesa & Vacik, 2018) та (Fernandes & Botelho, 2003) чітко показують необхідність створення інтегрованих протипожежних стратегій, які не просто гасять вогонь, а керують ним. Наприклад, контрольовані підпали можуть відновлювати природні екологічні процеси. Доцільно розробляти регіональні програми ризик-менеджменту, які включатимуть картування вразливості, екологічне моделювання сценаріїв пожеж і розробку інфраструктури превентивного реагування.

Важливо відходити від «універсальних рішень» до моделей, які змінюються відповідно

до контексту, клімату, економіки та людського фактору.

Наукові підходи до відновлення лісів більше не можуть бути суто біологічними або лісогосподарськими. Вони повинні бути антропоцентричними, екосистемними та технологічно підсиленими. Лише така інтеграція – з урахуванням традицій, технологій, екології та соціальної відповідальності – забезпечить не лише повернення дерев, а й відновлення гармонії між людиною та природою.

Аналіз сучасних наукових джерел, присвячених проблематиці відновлення лісових екосистем, дозволяє сформулювати рекомендації, які сприятимуть підвищенню ефективності лісовідновлювальних заходів у контексті екологічних викликів сьогодення. Слід віддавати перевагу природним процесам, підтримуючи їх активними заходами, зокрема охороною територій, запобіганням випасу, контролем ерозії тощо. Необхідно орієнтувати відновлення не лише на деревну рослинність, а на повноцінне функціонування екосистеми. Інтеграція традиційних практик з сучасними інструментами дозволяє досягти більш стійких результатів як для екосистем, так і для місцевого добробуту. Будь-які екологічні ініціативи потребують широкого суспільного розуміння та підтримки. Рекомендується впроваджувати інформаційно-освітні кампанії, інтегрувати екологічну освіту в навчальні програми та створювати публічно доступні інформаційні платформи про цілі, процеси й результати лісовідновлення.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Наукове забезпечення процесів відновлення лісових екосистем є основою для їх довготривалої стабільності та стійкості. Інтеграція екологічних, біотехнологічних, інформаційних та управлінських підходів дозволяє ефективно вирішувати проблеми деградації лісів. Подальший розвиток міждисциплінарних досліджень і міжнародної співпраці є ключем до успішного відновлення лісових ландшафтів на глобальному рівні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Rakova B., Winter A. Leveraging traditional ecological knowledge in ecosystem restoration projects utilizing machine learning. ACM Knowledge Discovery and Data Mining (KDD) 2020 Conference Workshop “Fragile Earth: Data Science for a Sustainable Planet”, August 23–27, 2020, Virtual Conference. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.12387>.
2. Keenan R. J., Reams G. A., Achard F., de Freitas J. V., Grainger A., Lindquist E. Dynamics of global forest area: results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*. 2015. Vol. 352. P. 9–20.

3. Kahukina A., Patseva I. Assessment and forecast of atmospheric pollutant dynamics in the urban ecosystem of Zhytomyr. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. № 2(3(82)). P. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.326893>
4. Nyongesa K. W., Vacik H. Fire management in Mount Kenya: a case study of Gathiuru Forest Station. *Forests*. 2018. Vol. 9. P. 481.
5. Stanturf J. A., Palik B. J., Dumroese R. K. Contemporary forest restoration: a review emphasizing function. *Forest Ecology and Management*. 2014. Vol. 331. P. 292–323.
6. Tariq A., Shu H., Siddiqui S. та ін. Forest fire monitoring using spatial-statistical and geo-spatial analysis of factors determining forest fire in Margalla Hills, Islamabad, Pakistan. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2021. Vol. 12. P. 1212–1233.
7. Кагукіна А. М., Пацева І. Г. Взаємозв'язок метеорологічних параметрів та забруднюючих речовин у повітряному басейні міста Житомир. *Екологічні науки*. 2025. Вип. 1(58). С. 58–64.
8. Кагукіна А. М., Пацева І. Г. Графічний аналіз закономірностей сезонних температурних коливань та концентрації забруднювачів атмосфери міського середовища. *Екологічні науки*. 2024. Вип. 5(56). С. 193–197.
9. Marshall A. R., Waite C. E., Pfeifer M. та ін. Fifteen essential science advances needed for effective restoration of the world's forest landscapes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2023. Vol. 378. Article ID: 20210065. DOI: <http://doi.org/10.1098/rstb.2021.0065>
10. Пацева І. Г., Кагукіна А. М., Луньова О. В. Тенденції зміни клімату Житомирщини. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 6(51). С. 156–159.
11. Aerts R., Honnay O. Forest restoration, biodiversity and ecosystem functioning. *BMC Ecology*. 2011. Vol. 11. Article ID: 29. DOI: <https://doi.org/10.1186/1472-6785-11-29>
12. Alayan R., Rotich B., Lakner Z. A comprehensive framework for forest restoration after forest fires in theory and practice: a systematic review. *Forests*. 2022. Vol. 13(9). Article ID: 1354. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13091354>
13. Uprety Y., Asselin H., Bergeron Y., Doyon F., Boucher J.F. Contribution of traditional knowledge to ecological restoration: practices and applications. *Écoscience*. 2012. Vol. 19. P. 225–237.
14. Shimamoto C. Y., Padial A. A., da Rosa C. M., Marques M. C. M. Restoration of ecosystem services in tropical forests: a global meta-analysis. *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13(12). Article ID: e0208523. DOI: [10.1371/journal.pone.0208523](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208523)
15. Pati K., Kaushik P., Malasiya D. та ін. Impacts of forest fire frequency on structure and composition of tropical moist deciduous forest communities of Bandhavgarh Tiger Reserve, Central India. *Trees, Forests and People*. 2024. Vol. 15. Article ID: 100489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100489>
16. Кагукіна А. М., Пацева І. Г. Аналіз показників монооксиду вуглецю, діоксиду азоту та аміаку в повітряному басейні міста Житомир за даними громадського моніторингу повітря ECOCITY. *Екологічні науки*. 2024. Вип. 3(54). С. 23–31.
17. Пацева І. Г., Кагукіна А. М. Коефіцієнти суттєвості відхилень середньомісячних показників температури повітря та кількості опадів в місті Житомир. *Екологічні науки*. 2024. Вип. 2(53). С. 238–242.
18. Луньова О. В., Кагукіна А. М. Аналіз антропогенного забруднення Житомирського регіону. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 3(48). С. 48–52.
19. Савчук, Л., Шуліпа, Р. Моніторинг загибелі деревостанів у Звірівському лісництві. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2025. Вип.1. С. 83–87. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-11>
20. Пацева І. В., Кагукіна А. М. Адаптація до зміни клімату міста Житомир. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2023. Вип. 3. С. 66–72.
21. Джам, О., Дяк, Т., Гулай, Л., Караїм, О., & Лавринюк, З. Моніторинг екологічного стану лісових ресурсів Філії «Рафалівське лісове господарство» ДП «Ліси України». *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. Вип. 4. С. 49–56. <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-4-7>
22. Лавринюк, З., Войцеховський, І., Гулай, Л., Караїм, О., & Джам, О. Еколого-статистичний аналіз лісовідновлювальної діяльності у Волинській області. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. Вип. 2. С. 36–47. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-2-5>

REFERENCES:

1. Rakova, B., & Winter, A. (2020). Leveraging traditional ecological knowledge in ecosystem restoration projects utilizing machine learning. In *ACM Knowledge Discovery and Data Mining (KDD) 2020 Conference Workshop «Fragile Earth: Data Science for a Sustainable Planet» (August 23–27, 2020, Virtual Conference)*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.12387>
2. Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9–20.

3. Kahukina, A., & Patseva, I. (2025). Assessment and forecast of atmospheric pollutant dynamics in the urban ecosystem of Zhytomyr. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(3(82)), 36–42. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.326893>
4. Nyongesa, K. W., & Vacik, H. (2018). Fire management in Mount Kenya: A case study of Gathiuru Forest Station. *Forests*, 9, 481.
5. Stanturf, J. A., Palik, B. J., & Dumroese, R. K. (2014). Contemporary forest restoration: A review emphasizing function. *Forest Ecology and Management*, 331, 292–323.
6. Tariq, A., Shu, H., Siddiqui, S., et al. (2021). Forest fire monitoring using spatial-statistical and geo-spatial analysis of factors determining forest fire in Margalla Hills, Islamabad, Pakistan. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12, 1212–1233.
7. Kahukina, A. M., & Patseva, I. H. (2025). Vzaiemozviazok meteorologichnykh parametriv ta zabrudniuiuchykh rehovyn u povitrianiomu baseini mista Zhytomyr [Correlation between meteorological parameters and pollutants in the air basin of Zhytomyr city]. *Ekologichni nauky*, 1(58), 58–64. [in Ukrainian]
8. Kahukina, A. M., & Patseva, I. H. (2024). Hrafichnyi analiz zakonomirnostei sezonnykh temperaturnykh kolyvan ta kontsentratsii zabrudniuvachiv atmosfery miskoho seredovyscha [Graphical analysis of seasonal temperature fluctuations and concentrations of urban atmospheric pollutants]. *Ekologichni nauky*, 5(56), 193–197. [in Ukrainian].
9. Marshall, A. R., Waite, C. E., Pfeifer, M., et al. (2023). Fifteen essential science advances needed for effective restoration of the world's forest landscapes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 378, 20210065. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0065>
10. Patseva, I. H., Kahukina, A. M., & Luniova, O. V. (2023). Tendentsii zminy klimatu Zhytomyrshchyny [Climate change trends in Zhytomyr region]. *Ekologichni nauky*, 6(51), 156–159. [in Ukrainian]
11. Aerts, R., & Honnay, O. (2011). Forest restoration, biodiversity and ecosystem functioning. *BMC Ecology*, 11, 29. DOI: <https://doi.org/10.1186/1472-6785-11-29>
12. Alayan, R., Rotich, B., & Lakner, Z. (2022). A comprehensive framework for forest restoration after forest fires in theory and practice: A systematic review. *Forests*, 13(9), 1354. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13091354>
13. Upreti, Y., Asselin, H., Bergeron, Y., Doyon, F., & Boucher, J. F. (2012). Contribution of traditional knowledge to ecological restoration: Practices and applications. *Écoscience*, 19, 225–237.
14. Shimamoto, C. Y., Padial, A. A., da Rosa, C. M., & Marques, M. C. M. (2018). Restoration of ecosystem services in tropical forests: A global meta-analysis. *PLoS ONE*, 13(12), e0208523. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208523>
15. Pati, K., Kaushik, P., Malasiya, D., et al. (2024). Impacts of forest fire frequency on structure and composition of tropical moist deciduous forest communities of Bandhavgarh Tiger Reserve, Central India. *Trees, Forests and People*, 15, 100489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100489>
16. Kahukina, A. M., & Patseva, I. H. (2024). Analiz pokaznykiv monooksydu vuhletsu, dioksydu azotu ta amiaku v povitrianiomu baseini mista Zhytomyr za danymy hromadskoho monitorynhu povitria ECOCITY [Analysis of carbon monoxide, nitrogen dioxide and ammonia in the air basin of Zhytomyr city based on ECOCITY public air monitoring data]. *Ekologichni nauky*, 3(54), 23–31. [in Ukrainian].
17. Patseva, I. H., & Kahukina, A. M. (2024). Koefitsiienty suttievoho vidkhylenia serednomisiachnykh pokaznykiv temperatury povitria ta kilkosti opadiv v misti Zhytomyr [Significance coefficients of deviations of monthly average air temperature and precipitation in Zhytomyr city]. *Ekologichni nauky*, 2(53), 238–242. [in Ukrainian].
18. Luniova, O. V., & Kahukina, A. M. (2023). Analiz antropohennoho zabrudnennia Zhytomyrskoho rehionu [Analysis of anthropogenic pollution in the Zhytomyr region]. *Ekologichni nauky*, 3(48), 48–52. [in Ukrainian].
19. Savchuk, L., & Shulyipa, R. (2025). Monitorynh zahybeli derevostaniv u Zvirivskomu lisnytstvi [Monitoring of tree stand mortality in the Zvirivske forestry]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku*, 1, 83–87. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-11> [in Ukrainian].
20. Patseva, I. V., & Kahukina, A. M. (2023). Adaptatsiia do zminy klimatu mista Zhytomyr [Adaptation to climate change in Zhytomyr city]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku*, 3, 66–72. [in Ukrainian]
21. Dzham, O., Diak, T., Hulai, L., Karaiim, O., & Lavryniuk, Z. (2024). Monitorynh ekologichnogo stanu lisovykh resursiv Filii “Rafalivske lisove hospodarstvo” DP “Lisy Ukrainy” [Monitoring of the ecological state of forest resources of the Rafalivske Forest Enterprise branch of SE “Forests of Ukraine”]. *Problemy khimii ta staloho rozvyt*, 4, 49–56. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-4-7> [in Ukrainian].
22. Lavryniuk, Z., Voitsekhovskiy, I., Hulai, L., Karaiim, O., & Dzham, O. (2024). Ekoloho-statystychnyi analiz lisovidnovliuvainoi diialnosti u Volynskii oblasti [Ecological and statistical analysis of reforestation activities in Volyn region]. *Problemy khimii ta staloho rozvyt*, 2, 36–47. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-2-5> [in Ukrainian].

УДК 631.421:628.4.043

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-13>

Інна РИБАЛКА

кандидат біологічних наук, доцент кафедри інженерної екології міст та кафедри ландшафтного проектування та садово-паркового мистецтва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Чорноглазівська, 17, м. Харків, Україна, 61002

ORCID: 0000-0001-8225-3041

Scopus Author ID: 56703200700

Ніка ІВАХ

здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Чорноглазівська, 17, м. Харків, Україна, 61002

Оксана МЕЛЬНИКОВА

кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Чорноглазівська, 17, м. Харків, Україна, 61002

ORCID: 0000-0001-5649-2997

Scopus Author ID: 57190493508

Оксана ЛЕНЕВИЧ

кандидат біологічних наук, молодший науковий співробітник відділу екосистемології, Інститут екології Карпат Національної академії наук України, вул. Козельницька, 4, м. Львів, Україна, 79000; інженер кафедри ґрунтознавства і географії ґрунтів, Львівський національний університет імені Івана Франка, Університетська, 1, м. Львів, Україна, 79000

ORCID: 0000-0003-2258-2569

Юрій ВЕРГЕЛЕС

старший викладач кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Чорноглазівська, 17, м. Харків, Україна, 61002

ORCID: 0000-0002-4915-1489

Scopus Author ID: 41262433200

Бібліографічний опис статті: Рибалка, І., Івах, Н., Мельникова, О., Леневиц, О., Вергелес, Ю. (2025). Експериментальне дослідження деградації біоупаковки, паперових і звичайних пластикових пакетів у ґрунті. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 102–111, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-13>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ БІОУПАКОВКИ, ПАПЕРОВИХ І ЗВИЧАЙНИХ ПЛАСТИКОВИХ ПАКЕТІВ У ҐРУНТІ

Збільшення використання пластикових виробів та перехід до одноразової пластмаси призвели до надмірного накопичення пластикового сміття в навколишньому середовищі. Довговічність пластику оцінюється від сотень до тисяч років. За останні два десятиліття запропоновано альтернативу традиційним синтетичним полімерам – біопластик, але питання, пов'язані з його деструкцією, залишаються мало вивченими. **Мета дослідження** – порівняти швидкість деструкції у ґрунті паперових, звичайних одноразових поліетиленових пакетів та пакетів із маркуванням «біорозкладний». **Методологія.** Дослідження проведені на території міста Богодухова (Харківська область) у період із початку липня по кінець листопада 2024 року. Ділянку для відбору ґрунту обрано в саду зі стихійною трав'янистою рослинністю на території одного із приватних домогосподарств. Ґрунт перенесено до 15 прозорих пластикових контейнерів однакового розміру і форми. У п'ять із них було закладено фраг-

менти звичайного одноразового поліетиленового пакета, так само у н'ять – біорозкладного, у три – фрагменти паперового пакета, решта два контейнери лишили просто з ґрунтом (контроль). Усі контейнери витримували в однакових умовах. Аналіз проводили за характеристиками втрати фізичної цілісності пакетів на 36-тий день, 85-тий і 141-ий день від закладення експерименту. Площу ділянок, які піддалися деструкції, визначали з використанням програмного забезпечення ItagJ. **Наукова новизна.** Побудовано лінійну регресійну модель процесу деструкції біоупаковки. **Висновки.** Біорозкладні пакети починають розкладатися швидше, ніж звичайні одноразові поліетиленові пакети, що підтверджено статистично, і ця різниця проявляється щонайменш вже після місяця від початку експерименту. Майже за три місяці експерименту рівень деструкції біоупаковки досягнув 10 %, але повній деструкції, як очікувалось, вони за цей час не піддалися. За майже шість місяців експерименту (тобто термін, вдвічі більший, ніж заявлено виробником) біоупаковка досягнула лише 18 % деструкції. За результатами моделювання оцінено, що для повного руйнування фрагментів біорозкладних пакетів знадобиться близько 2 років за умови стабільності зовнішнього середовища.

Ключові слова: токсичність, звичайні пластикові пакети, біоупаковка, паперові пакети, ґрунтове середовище, деструкція, регресійна модель.

Inna RYBALKA

Candidate of Sciences in Biology, Associate Professor at the Department of Urban Environmental Engineering and Department of Landscape Design, Urban Forestry & Horticulture, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17 Chornoglazivska str., Kharkiv, Ukraine, 61002

ORCID: 0000-0001-8225-3041

Scopus Author ID: 56703200700

Nika IVAKH

Graduate (Master) Student at the Department of Urban Environmental Engineering, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17 Chornoglazivska str., Kharkiv, Ukraine, 61002

Oksana MELNIKOVA

Candidate of Sciences in Environmental Safety, Associate Professor at the Department of Urban Environmental Engineering, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17 Chornoglazivska str., Kharkiv, Ukraine, 61002

ORCID: 0000-0001-5649-2997

Scopus Author ID: 57190493508

Oksana LENEVYCH

Candidate of Sciences in Biology, Junior research fellow at the Division of Ecosystems Science, The Institute of Ecology of the Carpathians of the NAS of Ukraine, 4 Kozelnytska str., Lviv, Ukraine, 79000; Engineer at the Department of Soil Science and Soil Geography, Ivan Franko National University of Lviv, 1 Universytetska str., Lviv, Ukraine, 79000

ORCID: 0000-0003-2258-2569

Yuriy VERGELES

Senior Lecturer at the Department of Urban Environmental Engineering, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17 Chornoglazivska str., Kharkiv, Ukraine, 61002

ORCID: 0000-0002-4915-1489

Scopus Author ID: 41262433200

To cite this article: Rybalka, I., Ivakh, N., Melnikova, O., Lenevych, O., Vergeles, Yu. (2025). Eksperymentalne doslidzhennia dehradatsii bioupakovky, papеровykh i zvychaynykh plastykovykh paketiv u gruntі [Experimental study of degradation of bio-based packaging, paper and conventional plastic bags in soil]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 102–111, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-13>

EXPERIMENTAL STUDY OF DEGRADATION OF BIO-BASED PACKAGING, PAPER AND CONVENTIONAL PLASTIC BAGS IN SOIL

*The increased use of plastic products and the shift to single-use plastics have led to an excessive accumulation of plastic waste in the environment. The durability of plastic is estimated at hundreds to thousands of years. Over the past two decades, bioplastics have been proposed as an alternative to traditional synthetic polymers, but issues related to their degradation remain poorly studied. **The purpose of this study** is to compare the degradation rates of paper and conventional disposable plastic bags, as well as bags labeled “biodegradable”, in soil. **Research methodology.** The research was done in the city of Bohodukhiv (Kharkiv Oblast) from early July till late November 2024. The site for soil sampling was selected in a garden with spontaneous herbaceous vegetation on the territory of a private household. The soil was transferred to 15 transparent plastic containers of the same size and shape. Five of the containers were filled with fragments of a regular disposable plastic bag, five with biodegradable plastic bags, three with fragments of a paper bag, and the remaining two containers were left with bare soil (control). All containers were kept in the same conditions. The analysis was carried out according to the characteristics of the loss of physical integrity of the bags on the 36th, 85th, and 141st day after the start of the experiment. The surface area of patches that underwent destruction was measured using the ImageJ software. **Novelty.** A linear regression model of the process of bio-based packaging degradation was built. **Conclusions.** Biodegradable bags begin to decompose faster than conventional disposable plastic bags, with the difference statistically proven. This difference is evident at least after a month from the start of the experiment. In almost three months of the experiment, the level of bio-based packaging degradation reached 10 %, and they did not undergo complete degradation during this time as expected prior to the experiment. After almost six months of experimentation (i.e., twice as long as the manufacturer claimed), the bio-based packaging reached only 18 % degradation. According to the modeling results, it is estimated that it will take about 2 years for the fragments of biodegradable bags to completely break down, provided the environmental conditions are stable.*

Key words: toxicity, conventional disposal plastic bags, biodegradable plastics, paper bags, soil medium, destruction, linear regression.

Актуальність проблеми. Пластик – недорогий, легкий, міцний, довговічний, корозійностійкий матеріал із високими тепло- та електроізоляційними властивостями. Він знайшов своє широке застосування в різних галузях промисловості – від упаковки до виробництва іграшок, від продуктових пакетів до пластикових столових приборів, від соломинок до надрукованих на 3D-принтері ракетних сопел. Використання пластика у багатьох аспектах сприяє досягненню цілей сталого розвитку: так, пластик захищає їжу й допомагає зменшити обсяг утворення харчових відходів, дозволяє створювати легші транспортні засоби та ізолювати електричні кабелі (Thompson et al., 2009; Nielsen et al., 2019; Atiwesh et al., 2021). Як наслідок, світове виробництво пластику за майже 75 років суттєво зросло – із приблизно 2 мільйонів тонн у 1950 році до понад 400 мільйонів тонн у 2022 році (Pilapitiya & Ratnayake, 2024), що становить 200-кратне збільшення. Для виробництва пластмас використовують органічні сполуки. Крім того, звичайні полімери містять добавки, такі як стабілізатори, пігменти та токсичні хімічні компоненти (антипірени, антиоксиданти та спінювачі) (Gilbert, 2017). Попри істотні переваги використання пластику порівняно з іншими матеріалами, його недоліки стають все більш очевидними (Bilo et al.,

2018; Porta, 2021). Величезна кількість пластикових відходів є однією з найбільш актуальних проблем у світі, що становить серйозну загрозу як довкілля, так і для здоров'я людини (Barnes et al., 2008; Bergami et al., 2020; Thushari & Senevirathna, 2020; Porta, 2021; Івах та ін., 2024). Довговічність пластику оцінюється від сотень до тисяч років (Pilapitiya & Ratnayake, 2024; Yan, Cordier & Uehara, 2024). З цієї причини за останні два десятиліття запропоновано альтернативу традиційним синтетичним полімерам на основі нафти. Однією з таких альтернатив є пластик, що біологічно розкладається, або «біопластик», який є полімерами, виготовленими з відновлюваних ресурсів, таких як кукурудза, цукор, картопля, рис тощо (Atiwesh et al., 2021; Bilo et al., 2018).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині частка біопластику на ринку становить ~1 % та має тенденцію до зростання (Lackner, 2015; Thakur et al., 2018). Біорозкладні пластмаси можуть мати властивості, подібні до властивостей нафтохімічних полімерів, а також додаткові переваги завдяки мінімальному впливу на довкілля (Гадаєва & Самойленко, 2024). Біопластик розкладається мікроорганізмами – бактеріями, водоростями та грибами. Його деградація залежить від умов середовища (температура, вода, кисень) і хімічних

властивостей полімеру. Вважають, що за наявності достатньої вологості, кисню і відповідної кількості мікроорганізмів такий процес має спроможність завершитись дуже швидко (за 20–45 днів) (Гадаєва & Самойленко, 2024; Sarasa et al., 2009).

Проте експериментальні дослідження, проведені в Україні, показали, що за три місяці (тобто термін, вдвічі більший, ніж 45 днів) рівень деструкції біоупаковки від різних виробників у ґрунті складав у середньому 28 % в умовах теплиць та у середньому 45 % на присадибній території (Гадаєва & Самойленко, 2024).

Близькі оцінки швидкості розкладання біоупаковки наводять й інші автори (Sarasa et al., 2009; Gilbert, 2017). Отже, вивчення швидкості розкладання біоупаковки у ґрунті є актуальною науково-практичною задачею.

Мета дослідження – порівняти швидкість деструкції у ґрунті паперових, звичайних одноразових поліетиленових пакетів та пакетів із маркуванням «біорозкладний».

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження проведені на території міста Богодухова Харківської області у період із початку липня по кінець листопада 2024 року. Місто Богодухів є адміністративним центром Богодухівського району, розташоване на обох берегах річки Мерло в Лісостеповій зоні. Рельєф території переважно є рівнинним слабохвилястим. Ґрунтове різноманіття представлене чорноземами звичайними, типовими, реградованими, вилуженими та опідзоленими ґрунтами. Клімат помірно-континентальний. У середньому за рік спостерігається приблизно 160 днів з опадами, причому в холодний період їх кількість зазвичай більша. Вихідний тип ґрунту, з яким ми працювали, – чорноземи реградовані.

Ділянку для відбору ґрунту обрано в саду зі стихійною трав'янистою рослинністю на території одного із приватних домоволодінь. Індивідуальні зразки ґрунту для формування середньої проби змішаних зразків відбирали по діагоналях уявного квадрата. Прикопки робили із зони ризосфери рослин, при цьому рослинний відпад й верхній шар ґрунту (декілька сантиметрів) було знято. Відібраний ґрунт було ретельно перемішано в емальованій металевій ємності.

Далі його переносили до 15 прозорих пластикових контейнерів однакового розміру

і форми. Спочатку всі контейнери заповнили ґрунтом тільки на половину. Після цього до 13-ти із них заклали фрагменти пакетів розміром 9×9 см. Для цього ми заздалегідь підготували 5 фрагментів звичайного одноразового поліетиленового пакета, так само 5 фрагментів пакета з маркуванням «біорозкладний», а також 3 фрагменти паперового пакета. З доступних на ринку звичайних одноразових поліетиленових пакетів і біорозкладних ми обирали пакети для тестування так, щоб їхні фрагменти розміром 9×9 см мали максимально близьку масу. Розмір фрагментів також не був обраний випадково. Він дозволяв фрагменту вільно помістатися у контейнері і не мати заломів.

Для забезпечення рівномірної фільтрації води через ґрунтову товщу при поливі, у фрагментах звичайного одноразового поліетиленового пакета і фрагментах біорозкладного полімерного пакета ми зробили чотири тонких отвори голкою. Вони знаходились по центру фрагмента розміром 9×9 см і формували квадрат розміром 3×3 см.

Коли всі 13 фрагментів пакетів були акуратно розміщені на поверхні ґрунту, положення кожного із них зафіксували перманентним маркером на стінці контейнера. В двох контейнерах, які лишилися без фрагментів пакетів, ми так само зробили позначки перманентним маркером (це дозволяло нам у ході експерименту відбирати ґрунт для лабораторного аналізу з однакової глибини).

На цьому етапі роботи кожен із контейнерів також отримав свій унікальний номер. Контейнери, в яких знаходилися фрагменти звичайного одноразового пакета, отримали номери «З-1», «З-2», ..., «З-5». Контейнери, в яких знаходилися фрагменти пакета з маркуванням «біорозкладний», отримали номери «Б-1», «Б-2», ..., «Б-5». Нарешті контейнери, в яких знаходилися фрагменти паперового пакета, отримали номери «П-1», «П-2», «П-3». Після цього всі 13 контейнерів досипали ґрунтом. Від краю ємності ми залишили 1 см заглиблення для поливу.

Як зазначено вище, два контейнери містили тільки ґрунт (контроль). В одному із них ми не перешкоджали спонтанному проростанню рослин із наявного банку насіння (він отримав номер «К+Р»), а в іншому всі паростки систематично видаляли (він отримав номер «К»).

Усі 15 контейнерів витримували в однакових умовах (температура, відносна вологість повітря, освітленість), які систематично контролювали. Періодично, коли ґрунт у контейнерах висихав, його поливали однаковою об'ємом води. При появі стихійної рослинності у всіх контейнерах, крім одного, всі рослини видаляли. З початку жовтня в приміщенні, де знаходяться контейнери, увімкнули автономне опалення. Температура в приміщенні була стабільною і трималася на рівні 20 °С.

В ході експерименту, спочатку на 36-тий день (тобто приблизно через місяць після закладення експерименту), потім на 85-тий (приблизно через 3 місяці після закладення експерименту) і, нарешті, на 141-ий (майже через 6 місяців після закладення експерименту) у всіх контейнерах верхній шар ґрунту акуратно знімали. Ґрунт безпосередньо у зоні контакту з закладеними фрагментами відбирали для лабораторного аналізу, а самі фрагменти уважно вивчали на предмет розкладання. У даній роботі ми зосередили увагу власне на процесі біодеструкції.

Під час вивчення деструкції фрагментів звичайного одноразового поліетиленового пакета і пакета з маркуванням «біорозкладний» у серпні й жовтні 2024 р. ми діставали зразки з контейнерів. З кожного із них обережно знімали залишки ґрунту. Зразок викладали на аркуш білого паперу і фотографували за допомогою цифрової камери. Після цього

досліджувані фрагменти знову повертали до відповідних контейнерів і засипали ґрунтом, а отримані фотознімки опрацьовували за допомогою комп'ютерних програм. Натомість під час вивчення деструкції фрагментів біопаківки у кінці листопада, коли деякі зразки піддалися деструкції значно сильніше, ніж інші, така маніпуляція могла спричинити порушення їх цілісності, тому всі зразки залишили у контейнерах і фотографували безпосередньо на поверхні ґрунту.

Площу ділянок, які піддалися деструкції, визначали з використанням програмного забезпечення *ImagJ*. Ця програма працює з високою точністю, проте вона є досить чутливою до розмаїття кольорів на знімках, що вимагає певної попередньої обробки зображень. Крім того, в міру збільшення рівня деструкції фрагментів пакетів, робота в цій програмі ставала все більше кропіткою і вимагала посиленої уваги.

В нашому дослідженні для налаштування яскравості фотознімків на підготовчому етапі роботи використано графічний редактор *Microsoft Office 2010*. Для мінімізації розмаїття кольорів на знімках використано програму *CorelDRAW v.16*, що дозволяла не тільки оцифрувати деякі області, які піддалися деструкції, а, що найголовніше, провести реконструювання контурів фрагментів пакетів. Без цих двох маніпуляцій робота у програмі *ImagJ v.6* не завжди була ефективною. Найскладніше в обох

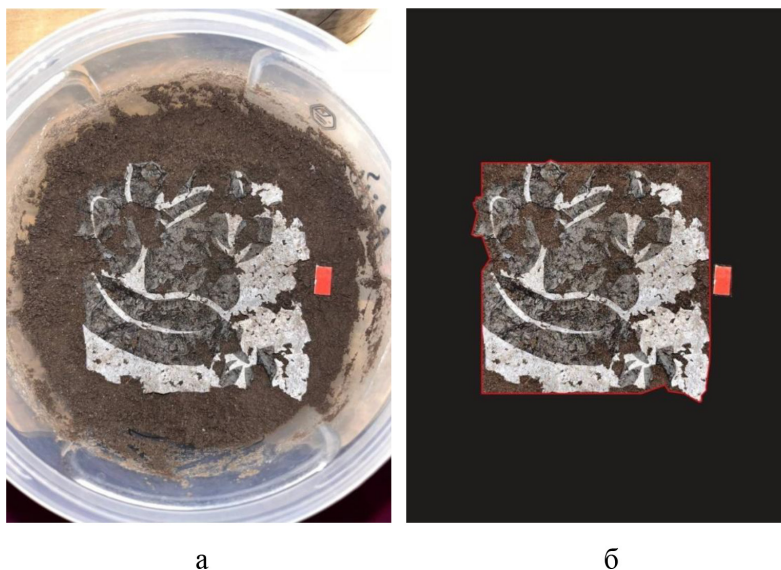


Рис. 1. Зовнішній вигляд фрагмента біорозкладного полімерного пакета (зразок № 3) майже через шість місяців після закладення експерименту та результати реконструкції його форми у програмі *CorelDRAW v.16*: а – вихідне зображення, б – після обробки

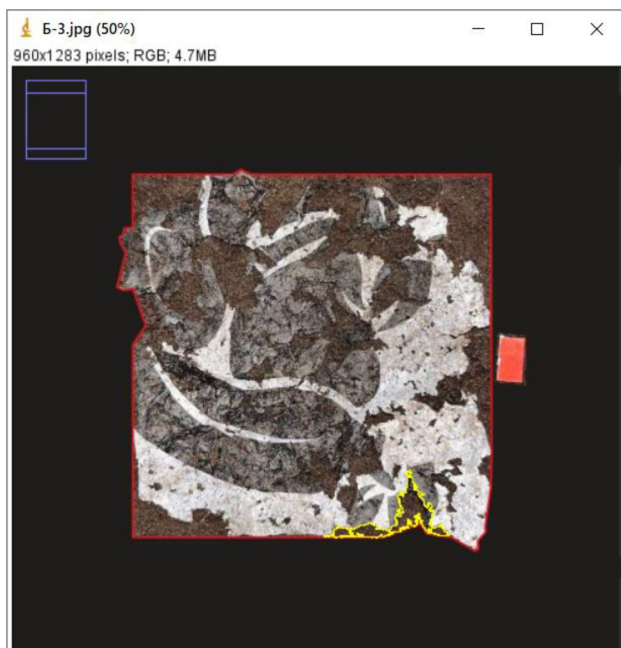


Рис. 2. Робота з фрагментом біорозкладного полімерного пакета (зразок № 3) майже через шість місяців після закладення експерименту: вимірювання площі ділянки, яка піддалася деструкції у ґрунтовому середовищі, за допомогою програми *ImagJ v.6* (довжина смужки праворуч становить 1 см)

програмах було працювати з фрагментом біоупаковки, на якому був нанесений виробником малюнок чорного кольору (зразок № 3), особливо у кінці експерименту, коли ми вимушені були лишити його на поверхні ґрунту (рис. 1, 2).

Статистичний аналіз зібраних даних передбачав розрахунок базових статистик, тестування вихідних даних на нормальність розподілу, порівняння вибірок, визначення взаємозв'язку між вибірками, а також розробку математичної моделі та прогнозування.

Перевірку достовірності середнього арифметичного здійснювали з використанням критерію Стюдента. Тест на нормальність передбачав розрахунок відношення розмаху мінливості до середнього квадратичного відхилення. Для порівняння вибірок застосовували непараметричний критерій Манна-Уїтні (U). Ми вдавалися до методів непараметричної статистики, оскільки під час визначення рівнів деструкції фрагментів звичайних одноразових поліетиленових пакетів виявилось, що будь-яка мінливість досліджуваної ознаки відсутня.

Для визначення взаємозв'язку між досліджуваними ознаками – середній рівень деструкції фрагментів біорозкладного пакета та день від

початку експерименту, з урахуванням об'єму вибірок ($n_1 = n_2 = 4$), розраховували z -показник Фішера (Mac Berthouex & Brown, 2002). Для розробки математичної моделі проведено повний регресійний аналіз за методикою, що наведена в методичних рекомендаціях (Бараннік, 2007).

За час проведення експерименту звичайні пакети зовсім не піддалися деструкції і зберегли 100 % від своєї вихідної площі (рис. 3). Паперові пакети розклалися майже за місяць, як ми і очікували на початку експеримента (рис. 4). Біорозкладні пакети через місяць після закладення експерименту тільки почали розкладатися ($97,6 \pm 0,7$ % від вихідної площі). Середнє арифметичне є достовірним із високим рівнем надійності: $t = 146,1$, що значно перевищує $t_{st} = 8,6$, $k = 4$, $P < 0,001$. Деякі базові статистики для вибірки, що ми розглядаємо, становили: мінімум – 96,1 %, максимум – 99,3 %, розмах варіації – 3,2 %, середнє квадратичне відхилення і коефіцієнт варіації співпадають, обидва становлять $1,5 \pm 0,5$ % (міра варіювання ознаки низька). Найбільшій деструкції піддався зразок № 2, найменшій – № 5.

Майже через три місяці фрагменти біорозкладного пакета зберегли $89,6 \pm 2,8$ % від вихідної площі, але повній деструкції, як очікувалось на початку експеримента, вони за цей час не піддалися. Середнє арифметичне є достовірним: $t = 32,5$, що так само значно перевищує



Рис. 3. Зразок звичайного пакета № 1 на час закінчення експерименту (кінець листопада 2024 р.)



Рис. 4. Фрагменти зразка № 2 паперового пакета у контейнері (спостерігаються лише поодинокі фрагменти)

$t_{st} = 8,6, k = 4, P < 0,001$. Деякі базові статистики для вибірки, що ми розглядаємо, становили: мінімум – 79,4 %, максимум – 94,6 %, розмах

варіації – 15,2 %, середнє квадратичне відхилення – $6,2 \pm 1,9$ % (не високе), коефіцієнт варіації – $6,9 \pm 2,4$ % (міра варіювання ознаки низька). Найбільшій деструкції піддався зразок № 3, найменшій – № 4.

Нарешті майже за шість місяців експерименту (тобто термін, вдвічі більший, ніж заявляють виробники) біорозкладні пакети зберегли $82,5 \pm 5,1$ % від вихідної площі. Середнє арифметичне є достовірним: $t = 16,2$, що вдвічі перевищує $t_{st} = 8,6, k = 4, P < 0,001$. Деякі базові статистики для вибірки, що ми розглядаємо, становили: мінімум – 62,8 %, максимум – 91,4 %, розмах варіації – 28,6 %, середнє квадратичне відхилення – $11,4 \pm 3,6$ % (не високе), коефіцієнт варіації – $13,8 \pm 5,0$ % (міра варіювання ознаки середня). Найбільшій деструкції піддався зразок № 3 (рис. 5), найменшій – № 5 (рис. 6).

Статистично різниця між рівнем деструкції біорозкладних пакетів та звичайних

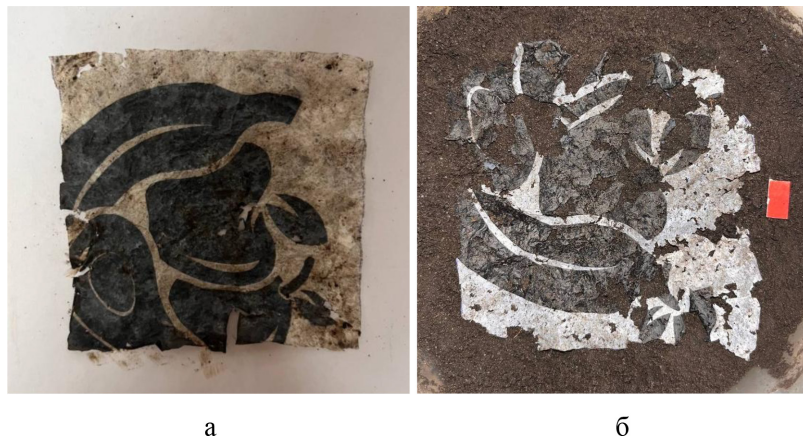


Рис. 5. Зразок біорозкладного пакета № 3:

а – через місяць після закладення експерименту; б – майже через шість місяців після закладення експерименту (з усіх зразків найбільше піддався деструкції)

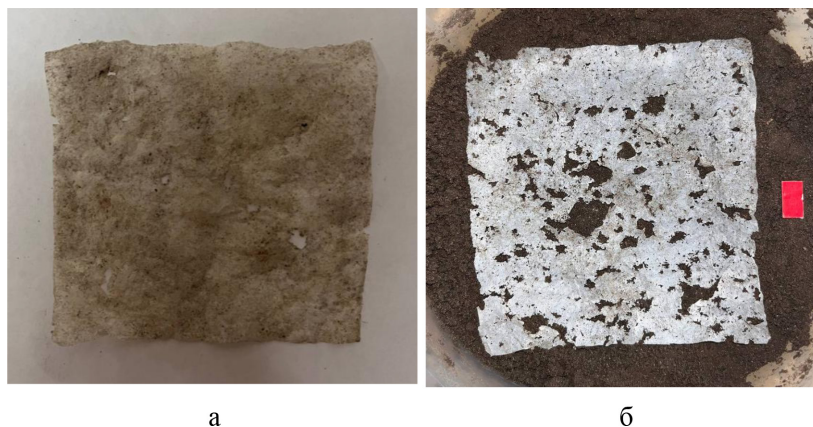


Рис. 6. Зразок біорозкладного пакета № 5:

а – через місяць після закладення експерименту; б – майже через шість місяців після закладення експерименту (з усіх зразків найменше піддався деструкції)

одноразових поліетиленових пакетів є достовірною. Попарне порівняння 2 вибірок через місяць після закладення експерименту з використанням методів непараметричної статистики дозволили відхилити «нульову» гіпотезу з високим рівнем надійності: критерій Манна-Уїтні $U_\phi = 0 < U_{st} = 1$; $n_1 = 5$, $n_2 = 5$, $P < 0,01$. Аналогічні результати ми отримали на 85-й і 141-й день від початку експерименту.

Наступним кроком, за допомогою програмних засобів *MS Excel 2010* ми побудували точковий графік розсіювання результатів вимірювання, на якому по осі ординат було відображено середній рівень деструкції фрагментів біоупаковки, а по осі абсцис – день від початку експерименту, коли проводили вимірювання. Розподіл точок на графікові наштотхнув нас на припущення про наявність тісного взаємозв'язку між досліджуваними ознаками.

За допомогою кореляційного аналізу на рівні значущості $P < 0,01$ ми виявили тісний від'ємний взаємозв'язок між середньою величиною рівня деструкції фрагментів біоупаковки і тривалістю експерименту. Вибірковий коефіцієнт кореляції Пірсона (без поправки): $-0,99$, з поправкою $-1,00$, z -показник Фішера $-5,11$. Результати перевірки z -показника Фішера на достовірність: $t_z = 5,11$, що перевищує стандартну величину $t_{st} = 4,30$, $k = 2$, $P < 0,05$. Перевірка вихідних даних на нормальність, яка передувала кореляційному аналізу, дала позитивний результат

(для даних, які відображають середній рівень деструкції, – «середня надійність» тесту, для даних, які відображають день від початку експерименту, – «висока надійність» тесту). Це дозволило нам використати методи параметричної статистики під час аналізу зібраних експериментальних даних.

Ми припустили, що процес деструкції біоупаковки у ґрунтовому середовищі можна описати за допомогою рівняння лінійної регресії. На основі повного регресійного аналізу ця гіпотеза була стверджена. Результати повного регресійного аналізу, що відображає динаміку розкладання біорозкладних пакетів, представлено на рис. 7. Розсіювання залишків регресії вказувало про їх незалежність одне від одного. Всі розрахунки та побудову графіка здійснено засобами *MS Excel 2010*.

Процес деструкції біоупаковки (y) описано лінійною регресією:

$$y = -0,1301x + 100,9904, \quad (1)$$

де x – день від початку розкладання біоупаковки у ґрунті.

Коефіцієнт детермінації регресійного рівняння $R^2 = 0,9861$. Порівняння з розподілом Фішера показує, що регресія має місце: $F_\phi = 141,88$ (при $F_{st} = 98,50$, $P < 0,01$).

Прогноз показує, що для повної деструкції біорозкладних пакетів знадобиться щонайменше 2 роки (за умови стабільності

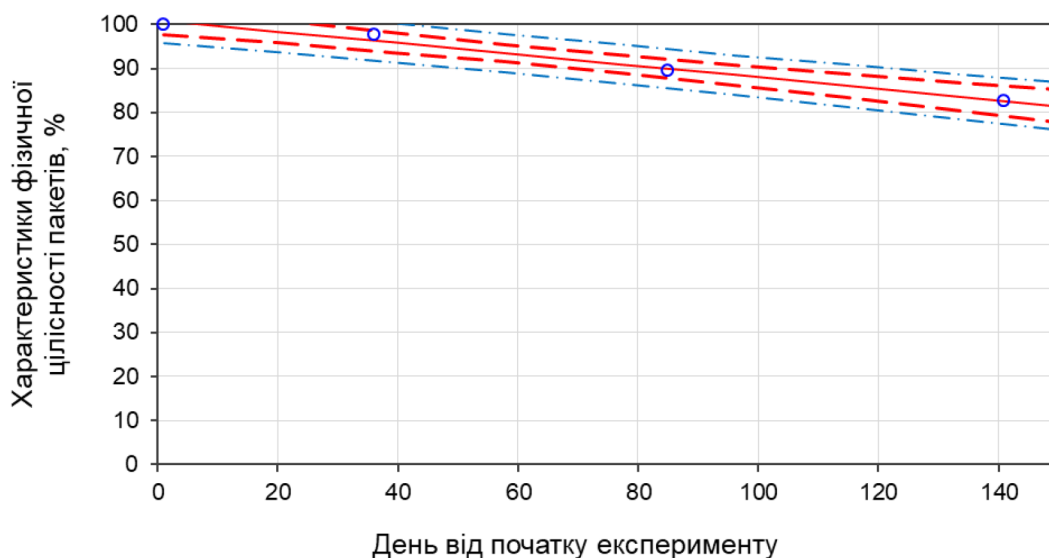


Рис. 7. Результати повного регресійного аналізу:
 лінія регресії (суцільна) і довірча область лінійної регресії як функція s_{yx}
 і критичні значення t -розподілу (пунктирні лінії: $P = 0,05$, тобто 95 %-й рівень довіри;
 штрихпунктирні лінії: $P = 0,01$, тобто 99 %-й рівень довіри)

зовнішніх умов). Так, за рік (365 днів) рівень їхньої деструкції міг би досягнути 54 %, за півтора роки (548 днів) – 30 %, за два роки (730 днів) – 6 %.

У природних умовах, з чітко вираженими холодним і теплим сезонами, а також в умовах дефіциту вологи влітку цей процес триватиме ще довше.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Біорозкладні пакети починають розкладатися швидше, ніж звичайні, що підтверджено статистично, і ця різниця проявляється щонайменш вже після місяця від початку експерименту в умовах вегетаційного сезону в зоні помірного клімату. Майже за три місяці експерименту рівень деструкції зразків біоупаковки досягнув 10 %, але повній деструкції, як очікувалось, вони за цей час не піддалися.

За майже шість місяців експерименту (тобто термін, вдвічі більший, ніж традиційно заявляють виробники) біоупаковка досягнула 18 % деструкції. Процес деструкції біоупаковки описано лінійною регресією. Моделювання показує, що для повного руйнування фрагментів біорозкладних пакетів знадобиться щонайменше 2 роки (за умови стабільності зовнішніх умов).

Треба також зауважити, що режим внесення води до контейнерів під час проведеного нами експерименту можна було синхронізувати з актуальними погодно-кліматичними умовами, тобто поливати контейнери тільки в ті дні, коли відбувалися опади. Це забезпечило б максимальну наближеність нашого експерименту до реальних умов ґрунтового середовища, в яких відбувається деструкція полімерів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бараннік В. О. Методичні вказівки до виконання курсової роботи «Розробка лінійної регресійної моделі впливу скиду стічних вод підприємства на якість річкової води в контрольному створі» з дисципліни «Моделювання і прогнозування стану довкілля». Харків : Харківська національна академія міського господарства, 2007. 20 с.
2. Гадаєва Ю. С., Самойленко Н. М. Дослідження біорозкладання одноразового пакування. *Екологічні науки*. 2024. № 3(54). С. 139–143.
3. Івах Н. А., Рибалка І. О., Мельнікова О. Г., Вергелес Ю. І., Леневиц О. І. Біорозкладані матеріали для пакетів як альтернатива звичайним пластиковим пакетам. *Science in the modern world: innovations and challenges: III міжнар. науково-практ. конф., м. Торонто, 21 лист. 2024 р.* 2024. С. 270–275.
4. Atiwesh G., Mikhael A., Parrish C.C., Banoub J., Le T-A.T. (2021). Environmental impact of bioplastic use: A review. *Heliyon*. 2021. Vol. 7. № 9. e07918.
5. Barnes D. K. A., Galgani F., Thompson R. C., Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of The Royal Society B. Biological Sciences*. 2008. Vol. 364, P. 1985–1998.
6. Bergami E., Rota E., Caruso T., Birarda G., Vaccari L., Corsi I. Plastics everywhere: first evidence of polystyrene fragments inside the common Antarctic collembolan *Cryptopygus antarcticus*. *Biology Letters*. 2020. Vol. 16. № 6. 0093.
7. Bilo F., Pandini S., Sartore L., Depero L.E., Garguilo G., Bonassi A., Federici S., Bontempi E. A sustainable bioplastic obtained from rice straw. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 200. P. 357–368.
8. Gilbert M. Chapter 1 – Plastics Materials: Introduction and Historical Development. *Brydson's Plastic Materials*. 8th ed. / Gilbert M., ed. 2017. P. 1–18.
9. Lackner M. Bioplastics. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 2015.
10. Mac Berthouex P., Brown L.C. Statistics for Environmental Engineers. 2nd ed. Boca Raton, 2002. 456 p.
11. Nielsen T. D., Hasselbalch J., Holmberg K., Strippel J. Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle. *WIREs Energy and Environment*. 2019. Vol. 9. № 1. e360.
12. Pilapitiya P. G. C. N. T., Ratnayake A. S. The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*. 2024. Vol. 11. 100220.
13. Porta R. Anthropocene, the plastic age and future perspectives. *FEBS OpenBio*. 2021. Vol. 11. № 4. P. 948–953.
14. Sarasa J., Gracia J.M., Javierre C. Study of the biodegradation of a bioplastic material waste. *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100. № 15. P. 3764–3768.
15. Thakur S., Chaudhary J., Sharma B., Verma A., Tamulevicius S., Thakur V. K. Sustainability of bioplastics: Opportunities and challenges. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2018. Vol. 13. P. 68–75.
16. Thompson R. C., Moore C. J., vom Saal F. S., Swan S. H. Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of The Royal Society B. Biological Sciences*. 2009. Vol. 364. P. 2153–2166.
17. Thushari G. G. N., Senevirathna J. D. M. Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*. 2020. Vol. 6. № 8. e04709.

18. Yan H., Cordier M., Uehara T. Future Projections of Global Plastic Pollution: Scenario Analyses and Policy Implications. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. № 2. 643.

REFERENCES:

1. Barannik, V. O. (2007). Metodichni vказivky do vykonannya kursovoyi roboty "Rozrobka liniynoyi regresiynoyi modeli vplyvu skydu stichnykh vod pidpriemstva na yakist' richkovoyi vody v kontrol'nomu stvori" z dystsypliny "Modeliuvannya i prognozuvannya stanu dovkillia [Guidelines for the course work "Development of a linear regression model of the impact of enterprise wastewater discharge on river water quality in the control sampling point" on the learning discipline "Environmental Modeling and Forecasting"]. Kharkiv, National Academy of Municipal Economy, 20 p. [in Ukrainian].
2. Hadaieva, Yu., & Samoilenko, N. (2024). Doslidzhennia biorozkladannia odnorazovoho pakuvannia [Research on biodegradation of disposable packaging]. *Ekologichni Nauky. – Environmental Sciences*, 3(54), 139–143. [in Ukrainian].
3. Ivakh, N. A., Rybalka, I. O., Melnikova, O. G., Vergeles, Yu. I., & Lenevych, O. I. (2004). Biorozkladani materialy dlia paketiv yak al'ternatyva zvychaynym plastykovym paketam [Biodegradable packaging materials as an alternative to conventional plastic ones]. *Science in the modern world: innovations and challenges: III International Scientific Conference*, Toronto, 21 November 2024, 270–275. [in Ukrainian].
4. Atiwesh, G., Mikhael, A., Parrish, C.C., Banoub, J., & Le, T-A.T. (2021). Environmental impact of bioplastic use: A review. *Heliyon*, 7(9), e07918.
5. Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2008). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of The Royal Society B. Biological Sciences*, 364, 1985–1998.
6. Bergami, E., Rota, E., Caruso, T., Birarda, G., Vaccari, L., & Corsi, I. (2020). Plastics everywhere: first evidence of polystyrene fragments inside the common Antarctic collembolan *Cryptopygus antarcticus*. *Biology Letters*, 16(6), 0093.
7. Bilo, F., Pandini, S., Sartore, L., Depero, L.E., Garguilo, G., Bonassi, A., Federici, S., & Bontempi, E. (2018). A sustainable bioplastic obtained from rice straw. *Journal of Cleaner Production*, 200, 357–368.
8. Gilbert, M. (2017). Chapter 1 – Plastics Materials: Introduction and Historical Development. In: Gilbert, M., ed. *Brydson's Plastic Materials*, 8th ed., 1–18.
9. Lackner, M. (2015). Bioplastics. In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons.
10. Mac Berthouex P., & Brown L.C. (2002). *Statistics for Environmental Engineers*. 2nd ed. Boca Raton, Lewis Publishers, A CBC Press Group. 456 p.
11. Nielsen, T. D., Hasselbalch, J., Holmberg, K., & Strippel, J. (2019). Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle. *WIREs Energy and Environment*, 9(1), e360.
12. Pilapitiya, P. G. C. N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100220.
13. Porta, R. (2021). Anthropocene, the plastic age and future perspectives. *FEBS OpenBio*, 11(4), 948–953.
14. Sarasa, J., Gracia, J.M., & Javierre, C. (2009). Study of the biodegradation of a bioplastic material waste. *Bioresource Technology*, 100(15), 3764–3768.
15. Thakur, S., Chaudhary, J., Sharma, B., Verma, A., Tamulevicius, S., & Thakur, V.K. (2018). Sustainability of bioplastics: Opportunities and challenges. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 68–75.
16. Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., & Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of The Royal Society B. Biological Sciences*, 364, 2153–2166.
17. Thushari, G. G. N., & Senevirathna, J. D. M. (2020). Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, 6(8), e04709.
18. Yan, H., Cordier, M., & Uehara, T. (2024). Future Projections of Global Plastic Pollution: Scenario Analyses and Policy Implications. *Sustainability*, 16(2), 643.

УДК 546.3-026.54-027.285:502.51(28):504.4](045)

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-14>

Світлана СОВГІРА

доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300

ORCID: 0000-0002-8742-7773

Олена КОЧУБЕЙ

доктор філософії, викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300

ORCID: 0000-0002-5047-6694

Наталія ДУШЕЧКІНА

кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300

ORCID: 0000-0002-4203-7122

Бібліографічний опис статті: Совгіра, С., Кочубей, О., Душечкіна, Н. (2025). Глобальні наслідки накопичення важких металів у прісноводних екосистемах. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 112–117, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-14>

ГЛОБАЛЬНІ НАСЛІДКИ НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ПРІСНОВОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

У статті розглянуто глобальну екологічну проблему накопичення важких металів у прісноводних екосистемах. Проаналізовано основні джерела надходження неорганічних забруднювачів у водойми, серед яких провідну роль відіграють промислові скиди, агрохімічний стік, міське водовідведення та атмосферне випадіння. Описано хімічні форми існування важких металів у водному середовищі, їхню міграцію, біодоступність та здатність до біоаккумуляції й біомагніфікації. Розкрито токсичну дію кадмію, свинцю, ртуті, міді, цинку, нікелю на водні організми, що проявляється на клітинному, фізіологічному та популяційному рівнях, призводячи до порушення функціонування біоценозів і зниження стійкості екосистем.

Наведено конкретні приклади забруднення річок Саксагань, Інгулець, Супій, Дністер, де зафіксовано перевищення гранично допустимих концентрацій металів у воді, донних відкладах і тканинах риби. Висвітлено випадки токсичного забруднення водойм у Китаї, Індії, США та інших країнах, що підтверджує глобальний характер проблеми. Проаналізовано сучасні методи дослідження та моніторингу, включаючи атомно-абсорбційну спектrophотометрію, біоіндикацію та геоінформаційне картування. Акцентовано на необхідності комплексного підходу до мінімізації екологічних наслідків, який передбачає поєднання технологічних рішень, нормативного регулювання, екосистемного управління та міжсекторальної співпраці.

Окреслено перспективи подальших досліджень, зокрема в напрямі розробки цифрових систем моніторингу, адаптації міжнародних екологічних стандартів та впровадження інноваційних засобів очищення водного середовища.

Ключові слова: важкі метали, прісноводні екосистеми, токсичність, біоаккумуляція, донні відклади, неорганічне забруднення, екологічна безпека, моніторинг, біоіндикація, водні ресурси.

Svitlana SOVHIRA

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor at the Department of Chemistry and Ecology, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID: 0000-0002-8742-7773

Olena KOCHUBEI

Doctor of Philosophy, Lecturer at the Department of Chemistry and Ecology, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID: 0000-0002-5047-6694

Nataliia DUSHECHKINA

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, and Ecology Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID: 0000-0002-4203-7122

To cite this article: Sovhira, S., Kochubei, O., Dushechkina, N. (2025). Hlobalni naslidky nakopychennia vazhkykh metaliv u prysnovodnykh ekosystemakh [Global impacts of heavy metals accumulation in freshwater ecosystems]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 112–117, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-14>

GLOBAL IMPACTS OF HEAVY METALS ACCUMULATION IN FRESHWATER ECOSYSTEMS

The article considers the global environmental problem of the accumulation of heavy metals in freshwater ecosystems. The main sources of inorganic pollutants entering water bodies are analyzed, among which industrial discharges, agrochemical runoff, urban drainage and atmospheric precipitation play a leading role. The chemical forms of the existence of heavy metals in the aquatic environment, their migration, bioavailability and ability to bioaccumulate and biomagnification are described. The toxic effect of cadmium, lead, mercury, copper, zinc, nickel on aquatic organisms is revealed, which manifests itself at the cellular, physiological and population levels, leading to disruption of the functioning of biocenoses and a decrease in the stability of ecosystems.

Specific examples of pollution of the Saksagan, Ingulets, Supii, Dniester rivers are given, where exceeding the maximum permissible concentrations of metals in water, bottom sediments and fish tissues was recorded. Cases of toxic pollution of water bodies in China, India, the USA and other countries are highlighted, confirming the global nature of the problem. Modern methods of research and monitoring are analyzed, including atomic absorption spectrophotometry, bioindication and geoinformation mapping. The need for an integrated approach to minimizing environmental impacts is emphasized, which involves a combination of technological solutions, regulatory regulation, ecosystem management and intersectoral cooperation.

Prospects for further research are outlined, in particular in the direction of developing digital monitoring systems, adapting international environmental standards and introducing innovative means of purifying the aquatic environment.

Key words: heavy metals, freshwater ecosystems, toxicity, bioaccumulation, bottom sediments, inorganic pollution, environmental safety, monitoring, bioindication, water resources.

Актуальність проблеми. Накопичення важких металів у прісноводних екосистемах є однією з найгостріших глобальних екологічних загроз сьогодення. Ці неорганічні забруднювачі мають здатність до тривалого збереження у водному середовищі, осадових відкладах і тканинах живих організмів, що створює передумови для їх довготривалого впливу на екосистемні процеси. Важкі метали, зокрема ртуть, кадмій, свинець, мідь, цинк та нікель, виявляють високу токсичність навіть у незначних концентраціях, порушуючи фізіолого-біохімічні функції водної флори та фауни, спричиняючи біоаккумуляцію та біомагніфікацію в харчових ланцюгах.

Особливої актуальності проблема набуває в умовах посилення антропогенного тиску – індустріалізації, інтенсивного сільськогосподарського виробництва, урбанізації та зміни клімату. Прісноводні ресурси дедалі більше зазнають техногенного навантаження,

що ставить під загрозу не лише збереження біорізноманіття, а й безпеку питного водопостачання та здоров'я людини. Крім того, глобальний характер циркуляції важких металів у біосфері потребує міжнародного підходу до моніторингу, регулювання і впровадження технологій очищення води.

Наукове дослідження закономірностей поширення, нагромадження та наслідків присутності важких металів у прісноводних екосистемах є надзвичайно важливим для розробки стратегії охорони довкілля, формування екологічної політики та впровадження практичних заходів з реабілітації водних об'єктів. Системний аналіз цієї проблеми дозволяє створити інтегровану екологічну модель оцінки ризиків і передбачення довгострокових наслідків забруднення, що зумовлює необхідність міждисциплінарного підходу – з урахуванням хімічних, біологічних, геоecологічних та соціальних аспектів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Останні наукові дослідження підкреслюють серйозність проблеми накопичення важких металів у прісноводних екосистемах та їхній вплив на біоту і здоров'я людини. Зокрема, комплексний огляд токсичних важких металів у водних системах акцентує на глобальному характері цього забруднення та його загрози для водних екосистем і людства.

У дослідженні, опублікованому в журналі *Environmental Toxicology and Chemistry*, розглядається вплив важких металів на водні організми та оцінюється ризик для людського здоров'я, підкреслюючи необхідність постійного моніторингу та управління забрудненням для забезпечення сталого розвитку морських екосистем.

Окремі дослідження фокусуються на конкретних регіонах. Наприклад, аналіз забруднення річки Стир в Україні виявив значні концентрації важких металів, зокрема цинку, кадмію та свинцю, що пов'язано з діяльністю Рівненської АЕС. Це підкреслює важливість регіональних досліджень для розуміння локальних джерел забруднення та їхнього впливу на екосистеми.

Крім того, дослідження, проведене в Пакистані, виявило накопичення важких металів у тканинах риб та птахів у водосховищі Мангла, що свідчить про потенційні ризики для харчового ланцюга та необхідність контролю за якістю води.

Важливо зазначити, що зміна клімату також впливає на мобільність важких металів у водних системах. Дослідження в гірських річках Колорадо показало, що підвищення температури сприяє вивільненню токсичних металів, таких як мідь і цинк, через танення підземного льоду.

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують, що накопичення важких металів у прісноводних екосистемах є багатогранною проблемою, що вимагає комплексного підходу, включаючи постійний моніторинг, розробку стратегій зменшення забруднення та врахування впливу зміни клімату на поведінку цих забруднювачів.

Мета дослідження – системний аналіз глобальних екологічних наслідків накопичення важких металів у прісноводних екосистемах, зокрема їхнього впливу на біоту, якість водного

середовища та здоров'я людини, а також визначення основних джерел забруднення, механізмів розповсюдження та способів мінімізації негативного впливу з урахуванням сучасних наукових підходів і міжнародного досвіду.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Важкі метали є одними з найпоширеніших і найнебезпечніших забруднювачів у прісноводних екосистемах, що становлять довготривалу загрозу для живих організмів, якості водних ресурсів, функціонування біоценозів та безпеки людського здоров'я. Їх стійкість до розкладу, здатність до накопичення, висока токсичність навіть у слідових концентраціях і широкий спектр джерел надходження зумовлюють перехід цієї проблеми з категорії локальних до глобальних (Zhang, Wang & Shi, 2021). Особливої актуальності вона набуває в умовах зростаючого техногенного тиску, деградації природних бар'єрів, порушення самоочисних механізмів водойм і зниження екологічної стійкості екосистем (USEPA, 2021).

До найпоширеніших і водночас найтоксичніших елементів, що накопичуються у водоймах, належать свинець, кадмій, ртуть, мідь, цинк, хром, нікель, ванадій, миш'як. Вони надходять у водне середовище через безпосередні викиди з промислових підприємств, шахт, металургійних комбінатів, разом зі зливовими та побутовими стоками, агрохімічним стоком із сільськогосподарських угідь, просочуванням з полігонів та звалищ (Романенко, Коваленко & Громова, 2021), а також внаслідок атмосферного перенесення й осадження пилу та аерозолів. Відсутність сучасних систем очищення на багатьох підприємствах, низький рівень екологічного контролю, корозія трубопроводів та несанкціоновані скиди лише поглиблюють ситуацію (Kim, Park & Lee, 2023).

У водоймах важкі метали перебувають у кількох формах: іонній, колоїдній, в комплексах з органічними речовинами або в складі зважених часток. У донних відкладах вони можуть утворювати малорозчинні сполуки, які зберігаються десятиліттями й становлять вторинне джерело забруднення. За зміни фізико-хімічних умов – коливань рН, температури, вмісту кисню – можливе повторне вивільнення металів у воду (Gumenyuk, Melnychuk & Rybak, 2022), особливо під час паводків, пересихання чи евтрофікації. Саме цей процес часто

спостерігається в умовах змін клімату, коли погодні аномалії сприяють різкому порушенню гідрохімічної рівноваги (Kim, Park & Lee, 2023).

Біологічний ефект важких металів проявляється через їх вплив на клітинні структури, генетичний матеріал, ферментні системи, гормональний баланс та імунітет. У риб спостерігається ураження зябер, печінки, нирок, накопичення металів у м'язах, що знижує здатність до розмноження. У фітопланктоні гальмується фотосинтез і біосинтез білків (Середя & Гончарук, 2021). Встановлено, що в тканинах коропа, виловленого в нижній течії Дніпра, вміст кадмію перевищував допустимі рівні у 3,4 рази, а у щуки – свинцю у 4,7 рази. У молюсків роду *Dreissena*, які широко використовуються як біоіндикатори, виявлено високу концентрацію ртуті, що корелює з інтенсивністю забруднення прилеглих осадів (USEPA, 2021).

Згідно з багаторічними спостереженнями, водойми Центральної та Східної України є зонами підвищеного ризику. У річках Саксагань, Інгулець, Рось, Псел, Сула фіксуються перевищення ГДК за міддю, цинком, кадмієм (Макарчук & Білоус, 2020). Наприклад, у 2021 році в районі м. Кременчук у воді Дніпра виявлено 0,064 мг/дм³ міді та 0,012 мг/дм³ свинцю, що удвічі перевищує нормативи. У 2022 році в районі Гребінки у річці Сула рівень кадмію у воді становив 0,006 мг/дм³, а в донних відкладах – понад 2,9 мг/кг. Аналогічно, у річці Супій в межах Черкаської області фіксували вміст цинку в донних осадах на рівні 270–310 мг/кг, що свідчить про багаторічне накопичення.

На міжнародному рівні ситуація також критична. У басейні річки Ганг щорічно з промислових районів Індії надходить понад 500 тонн свинцю, 200 тонн кадмію та понад 100 тонн ртуті. У Китаї, в районі Хубей, в осадах річок, що впадають у Яндзицзян, виявлено концентрації кадмію на рівні 15–20 мг/кг, що викликало масове отруєння риб і зниження популяцій водоплавних птахів. У США у Великих озерах протягом останніх десятиліть діють обмеження на вилов риби через накопичення метилртуті – у деяких випадках понад 1 мг/кг у м'язовій тканині лососевих. Це безпосередньо вплинуло на економіку рибного господарства, рекреацію і навіть рівень захворюваності на нейродегенеративні хвороби у прибережних регіонах.

Важкі метали також чинять опосередкований негативний вплив на екосистеми – порушують колообіг біогенів, стимулюють евтрофікацію, підвищують стійкість до антибіотиків у водній мікробіоті, пригнічують процеси самоочищення. У поєднанні з мікропластиком та органічними забруднювачами вони формують складні токсичні комплекси, які важко піддаються очищенню. Усе це суттєво знижує екологічний потенціал водойм, обмежує можливості використання води для питних потреб, зрошення, промисловості, рибальства та туризму.

У межах дослідження було застосовано атомно-абсорбційну спектrophотометрію, гідрохімічне зондування, спектрофлуориметрію, біотестування з використанням *Daphnia magna* та *Chlorella vulgaris*. Це дозволило визначити закономірності просторового та сезонного розподілу металів, оцінити ризики для біоти й сформувати карти забруднення. У зонах впливу техногенних джерел виявлено стійке підвищення фонових рівнів на відстані до 10–15 км униз за течією.

Отримані результати свідчать про необхідність формування екологічної політики нового типу – орієнтованої на запобігання, а не на ліквідацію наслідків. Необхідно розширювати систему державного моніторингу, вдосконалювати законодавчу базу, впроваджувати екосистемний підхід до управління річковими басейнами, інтегрувати просторове планування, створювати буферні зони та ландшафтно-гідрологічні елементи екомереж. Особливого значення набуває міжсекторальна співпраця між науковими установами, громадськістю, бізнесом та органами влади, а також активна участь України в реалізації міжнародних угод (Водна рамкова директива ЄС, Конвенція Еспо, SDG–2030 тощо).

Висновки і перспективи подальших досліджень. Накопичення важких металів у прісноводних екосистемах є складною міждисциплінарною проблемою, що має глибокі екологічні, соціальні та економічні наслідки. Дослідження свідчать, що ці забруднювачі активно циркулюють у гідросфері, акумулюються в донних відкладах, тканинах гідробіонтів, проникають у трофічні ланцюги й потенційно загрожують здоров'ю людини. У водоймах України та світу фіксуються регулярні випадки перевищення допустимих рівнів свинцю, кадмію, міді, цинку

та ртуті, що призводить до деградації біорізноманіття, зміни структури біоценозів, біоаккумуляції токсикантів у рибі та зниження екосистемної стійкості.

Встановлено, що сучасні фізико-хімічні методи аналізу дозволяють детально досліджувати динаміку металів у воді, осадах і біологічних об'єктах, а їх поєднання з біотестуванням і геоінформаційними системами підвищує точність оцінки екологічного ризику. Проте проблема важких металів вимагає не лише наукового моніторингу, а й практичних рішень: модернізації очисних споруд, впровадження природоорієнтованих технологій, фіторе mediaції, посилення екологічного контролю та оновлення нормативної бази.

Перспективними напрямками подальших досліджень є:

- створення просторово-часових моделей міграції важких металів у різних гідрологічних умовах;

- розроблення інтегрованих екотоксикологічних індексів для комплексної оцінки стану водойм;

- дослідження комбінованої дії важких металів із мікропластиком, ПАВами та органічними забруднювачами;

- вивчення генетичних і морфофункціональних змін у гідробіонтах під впливом хронічного металевого забруднення;

- адаптація міжнародних стандартів моніторингу (WFD, OECD, EPA) до умов України;

- розробка цифрових платформ для управління якістю води на основі відкритих даних, дистанційного зондування та інструментів штучного інтелекту.

Комплексний підхід до вивчення і мінімізації наслідків забруднення прісноводного середовища важкими металами є необхідною умовою для досягнення цілей сталого розвитку, збереження водних екосистем та забезпечення екологічної безпеки для людини та природи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Романенко В. М., Коваленко Л. П., Громова І. С. Екологічна безпека та технології очищення стічних вод із використанням наноматеріалів. *Екологічні науки*. 2021. № 4(35). С. 44–51.
2. Гуменюк С. В., Мельничук Ю. В., Рибак О. О. Перспективи застосування оксидів металів у наноформі для екологічного моніторингу. *Екологічна безпека*. 2022. № 1(29). С. 112–119.
3. Середя Н. В., Гончарук В. К. Фотокаталітичне очищення води від органічних забруднювачів: огляд сучасних технологій. *Хімія і технологія води*. 2021. 43(5). С. 67–76.
4. Pavlova O. A., Vasylenko I. M., Ivanova I. V. Assessment of heavy metal pollution in freshwater systems of Ukraine. *Environmental Problems*. 2022. 7(4). P. 200–207.
5. Das S., Khan A., Kumar A. Bioaccumulation and ecological risk assessment of heavy metals in the Ganges River, India. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. 27(12). P. 13845–13858.
6. Zhang L., Wang Q., Shi H., Song L. Heavy metal contamination in Chinese freshwater lakes: spatial distribution and ecological risks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. 208. 111661.
7. Kim Y.-J., Park J., Lee M. Influence of climate change on the remobilization of heavy metals in sediments of urban rivers. *Science of the Total Environment*. 2023. 859. 160018.
8. USEPA. Mercury contamination in the Great Lakes. United States Environmental Protection Agency. 2021. URL: <https://www.epa.gov/greatlakes>
9. Макаrchук О. В., Білоус В. В. Аналіз вмісту важких металів у воді річки Саксагань у межах Кривого Рогу. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Хімія*. 2020. 28(1). С. 88–95.

REFERENCES:

1. Romanenko, V. M., Kovalenko, L. P., Gromova, I. S. (2021). Ekologichna bezpeka ta tekhnolohii ochyshchennia stichnykh vod iz vykorystanniam nanomaterialiv [Environmental safety and technologies for wastewater treatment using nanomaterials]. *Ekologichni nauky – Environmental Sciences*, 4(35), 44–51 [in Ukrainian].
2. Humeniuk, S. V., Melnychuk, Yu. V., Rybak, O. O. (2022). Perspektyvy zastosuvannia oksydiv metaliv u nanoformi dlia ekolohichnoho monitorynhu [Prospects for the use of metal oxides in nanoform for environmental monitoring]. *Ekologichna bezpeka – Environmental Safety*, 1(29), 112–119 [in Ukrainian].
3. Sereda, N. V., Honcharuk, V. K. (2021). Fotokatalitychne ochyshchennia vody vid orhanichnykh zabrudniuvachiv: ohliad suchasnykh tekhnolohii [Photocatalytic water treatment from organic pollutants: a review of modern technologies]. *Khimia i tekhnolohiia vody – Chemistry and Water Technology*, 43(5), 67–76 [in Ukrainian].
4. Pavlova, O. A., Vasylenko, I. M., Ivanova, I. V. (2022). Assessment of heavy metal pollution in freshwater systems of Ukraine. *Environmental Problems*, 7(4), 200–207.

5. Das, S., Khan, A., Kumar, A. (2020). Bioaccumulation and ecological risk assessment of heavy metals in the Ganges River, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(12), 13845–13858.
6. Zhang, L., Wang, Q., Shi, H., Song, L. (2021). Heavy metal contamination in Chinese freshwater lakes: spatial distribution and ecological risks. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111661.
7. Kim, Y.-J., Park, J., Lee, M. (2023). Influence of climate change on the remobilization of heavy metals in sediments of urban rivers. *Science of the Total Environment*, 859, 160018.
8. United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2021). Mercury contamination in the Great Lakes. Retrieved from: <https://www.epa.gov/greatlakes>
9. Makarchuk, O. V., Bilous, V. V. (2020). Analiz vmistu vazhkykh metaliv u vodi richky Saksahan u mezakh Kryvoho Rohu [Analysis of heavy metal content in the Saksahan River within Kryvyi Rih]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriya: Khimiia – Bulletin of Dnipro University. Chemistry series*, 28(1), 88–95 [in Ukrainian].

ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА

УДК 351.862.4

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-15>

Михайло КОЗЯР

доктор педагогічних наук, професор, член-кореспондент НАПН, професор кафедри практичної психології та педагогіки, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна, 79000

ORCID: 0000-0001-7068-598X

Бібліографічний опис статті: Козяр, М. (2025). Організація науково-дослідної діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності з урахуванням викликів повномасштабної війни. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 118–123, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-15>

ОРГАНІЗАЦІЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ЛЬВІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ З УРАХУВАННЯМ ВИКЛИКІВ ПОВНОМАСШТАБНОЇ ВІЙНИ

У статті здійснено аналіз інноваційних шляхів організації науково-дослідної діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності з урахуванням викликів повномасштабної війни з метою підвищення якості підготовки курсантів, студентів та слухачів курсів післядипломної освіти. З метою забезпечення наукового, науково-технічного та інноваційного супроводу діяльності Державної служби з надзвичайних ситуацій на базі Львівського державного університету безпеки життєдіяльності активно впроваджуються різноманітні заходи науково-дослідної діяльності. Інноваційними науково-дослідними рішеннями в Університеті є: навчальна програма «Цивільний захист в умовах війни» для представників органів виконавчої влади та керівників екстрених служб з реагування на надзвичайні ситуації Європейського Союзу; науково-інноваційний центр для дослідження та розробку новітніх технологій з метою створення безпечного середовища в суспільстві; Центр дослідження пожеж у природних екосистемах; започаткування мультивекторної підготовки (створено кафедру протимінної діяльності, на якій здійснюється підготовка фахівців підрозділів ДСНС України на першому (бакалаврському) рівні освіти; ліцензовано освітню програму підготовки магістрів «Управління піротехнічними роботами та протимінною діяльністю»; організовано підготовку особового складу служби цивільного захисту за програмою «Організація піротехнічних робіт»; організовано навчальні локації: обстеження ґрунтової дороги; обстеження місцевості на деокупованих територіях; захист критичної інфраструктури; обстеження покинутих територій). Дослідження та експерименти, що проводяться в межах науково-дослідної діяльності, допомагають курсантам, слухачам і студентам Університету поглиблювати й розширювати свої знання в досліджуваній галузі.

Ключові слова: науково-дослідна діяльність, державна служба з надзвичайних ситуацій, курсанти, науково-інноваційна діяльність, наукові об'єднання.

Mykhailo KOZYAR

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine, Professor at the Department of Practical Psychology and Pedagogy, Lviv State University of Life Safety, 35 Kleparivska str., Lviv, Ukraine, 79000

ORCID: 0000-0001-7068-598X

To cite this article: Kozyar, M. (2025). Orhanizatsiia naukovo-doslidnoi diialnosti Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediiialnosti z urakhuvanniam vyklykiv povnomasshtabnoi viiny [Organisation of research activities at the Lviv state university of life safety in the context of the challenges of full-scale war]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 118–123, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-15>

ORGANISATION OF RESEARCH ACTIVITIES AT THE LVIV STATE UNIVERSITY OF LIFE SAFETY IN THE CONTEXT OF THE CHALLENGES OF FULL-SCALE WAR

The article analyses innovative approaches to organising research activities at the Lviv State University of Life Safety in the context of the challenges posed by the full-scale war, with the aim of improving the quality of training for cadets, students, and postgraduate course participants. In order to provide scientific, scientific-technical, and innovative support to the activities of the State Emergency Service, various research initiatives are actively being implemented at the Lviv State University of Life Safety. The University's innovative research initiatives include: the educational programme "Civil Protection in Wartime" for representatives of executive authorities and heads of emergency response services of the European Union; a scientific and innovation centre for research and development of advanced technologies aimed at creating a secure social environment; a Research Centre for Wildland Fire Studies; the launch of multi-vector training (including the creation of a Department of Mine Action, where specialists of the State Emergency Service of Ukraine are trained at the first (bachelor's) level of education; licensing of the master's programme "Management of Pyrotechnic Operations and Mine Action"; training of personnel of the civil protection service under the programme "Organisation of Pyrotechnic Operations"; the organisation of training sites for: inspection of dirt roads; survey of de-occupied areas; protection of critical infrastructure; inspection of abandoned territories). Research and experiments conducted within the framework of scientific activity help cadets, trainees, and students of the University to deepen and broaden their knowledge in the respective field of study.

Key words: research activity, State Emergency Service, cadets, scientific and innovative activity, scientific associations.

Актуальність проблеми. Науку поряд із мистецтвом, мораллю і цілеспрямованою дією особистості необхідно розглядати як найважливішу сферу забезпечення існування цивілізації (Сич, 2016). Водночас навіть у сучасному науковому світі немає єдиної позиції щодо статусу науки, на кваліфікаційні вимоги до результатів наукових досліджень і способів їхнього подання. У розвинутих державах світу наукові осередки здебільшого зосереджуються в університетах та наділені статусом дослідницьких центрів. Такий підхід забезпечує одночасне продукування нових наукових знань та їх ефективну передачу майбутнім фахівцям, здатним розв'язувати складні проблеми за допомогою сучасних наукових методів і технологій (Зацерковний, Тішаєв, Демидов, 2017, с. 136).

Як доцільно зазначає Ю. Козловський, формування та розвиток наукового потенціалу України передбачає оновлення системи наукової діяльності у ЗВО, що нині суттєво відрізняється від європейських стандартів. Це передусім: недостатня кількість часу, відведеного професорсько-викладацькому складу на наукову діяльність, що негативно позначається на їхній потенційній продуктивності; недостатнє фінансування наукового сектору ЗВО, що знижує як мотивацію до наукової діяльності; переваження викладачів навчально-виховною й організаційною роботою, що екстраполюється у формально-звітний характер наукової діяльності, знижуючи тим самим рейтинг

вітчизняних ЗВО з-поміж провідних університетів світу тощо (Козловський, 2012, с. 4).

Підвищення якості підготовки фахівців будь-якої спеціальності, зокрема й фахівців для Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), підвищення іміджу університетів у рейтинговій системі передбачає інтенсивне використання позитивного досвіду вітчизняних і зарубіжних університетів, розроблення та впровадження інноваційних підходів до організації науково-дослідної діяльності ЗВО. Однак науково-дослідна діяльність ЗВО як педагогічна проблема залишається недостатньо дослідженою.

У цьому контексті, варто також зазначити, що з початку війни в Україні 103 працівники ДСНС загинули, 1 вважається зниклим безвісти і 32 випускники Львівського державного університету безпеки життєдіяльності віддали своє життя, виконуючи службовий обов'язок. Ці трагічні втрати ще більше підкреслюють важливість якісної підготовки фахівців, наукової підтримки та вдосконалення освітнього процесу в умовах нових викликів і загроз.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема наукової та науково-дослідної діяльності не є новою для сучасної науки. Так, науковцями широко висвітлені питання методології наукових досліджень (В. Зацерковний (2017), В. Тішаєв (2017), В. Демидов (2017); І. Добронравова (2018); О. Руденко (2018), Т. Сич (2016)), особливостей організації наукових досліджень у сфері менеджменту

та безпеки організації (М. Козяр (2018; 2024), І. Коваль (2018; 2024)) та у контексті забезпечення національних інтересів (В. Горовий (2015)); розкрито теоретико-методологічні основи моделювання наукової діяльності вищого навчального закладу (Ю. Козловський (2012)); висвітлено безпекову діяльність крізь призму наукових досліджень (Р. Тринько (2020), В. Франчук (2020), І. Ревак (2020), А. Садеков (2010), Т. Хлевицька (2010) та ін.). Серед учених, які зосереджують увагу на методології наукових досліджень у сфері цивільного захисту, слід відзначити І. Ковалю (2018; 2024), А. Литвіну, О. Повстин, В. Покалюка, Л. Руденко. Вважаємо, що представлення досвіду науково-дослідної діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності лише збагатить і доповнить сучасну науку інноваційними шляхами організації наукових досліджень у ЗВО.

Метою статті є аналіз інноваційних шляхів організації науково-дослідної діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності з урахуванням викликів повномасштабної війни з метою підвищення якості підготовки курсантів, студентів та слухачів курсів післядипломної освіти.

Виклад основного матеріалу. Наукова і науково-дослідна діяльність у ЗВО є невід'ємною складовою освітньої діяльності і здійснюється з метою інтеграції наукової, навчальної і виробничої діяльності в системі вищої освіти. Теоретичний аналіз та узагальнення наукових досліджень, присвячених поняттю «науково-дослідницька діяльність» (В. Бакуменко (2021), Н. Чала (2021), М. Цедік (2021), Шишкіна, О. Носирев (2014)) дає змогу в узагальненому вигляді розглядати його як фундаментальні та прикладні наукові дослідження, спрямовані на отримання нових знань та їхнє застосування; експериментальні розробки, засновані на знаннях, отриманих під час проведення наукових досліджень; створення нових технологій та їхнє удосконалення. Загалом науково-дослідницька діяльність ЗВО базується на сукупності принципів, пріоритетними серед яких принципи:

- поступовості та всебічності засвоєння й використання методів, техніки виконання наукових досліджень, а також реалізації їхніх результатів;

- послідовності (перехід від простого до складного) в застосуванні методів і технологій виконання наукових досліджень;

- системності та наступності науково-дослідної роботи на всіх етапах (курсах) навчання з логічним ускладненням методів і форм наукової діяльності курсантів, студентів, слухачів;

- комплексності на основі широкого використання наукових, науково-технічних, науково-дослідних знань і навичок, а також їхньої реалізації.

Структура науково-дослідницької діяльності у ЗВО є сукупністю таких компонентів: мотив, мета, об'єкт, процес, продукт (Організація наукових досліджень у сфері менеджменту та безпеки організації, 2022, с. 123). Забезпечення активізації науково-дослідницької діяльності передбачає дію системи об'єктивних і суб'єктивних чинників. Об'єктивними мотивуючими чинниками науково-дослідної діяльності в ЗВО є наявність середовища, що стимулює інтерес до наукової діяльності; створення сучасної матеріально-технічної бази для занять науковою діяльністю; збагачення змістової частини програм підготовки студентів до проведення наукових досліджень, що реалізуються як у формі окремих навчальних дисциплін та у формі блоку тем, спрямованих на формування науково-дослідницьких компетентностей у навчальних дисциплінах, що вивчаються. До *суб'єктивних чинників* належить наявність в ЗВО наукових шкіл і компетентних викладачів-дослідників, готових до навчання науково-дослідницької діяльності та забезпечення її наступності в межах наукової школи.

Чому ж важлива науково-дослідна діяльність ЗВО? Її значущість полягає в тому, що майбутній фахівець ДСНС має бути підготовлений до дослідницької діяльності, яка зорієнтована на застосування наукових знань у проєктно-конструкторській та виробничо-технологічній частині службових обов'язків. Навички дослідницької роботи допомагають у повсякденній діяльності рятувальників визначати умови виконання бойового завдання, визначати власну оперативну-тактичну позицію, обґрунтовано відстоювати її, розробляти та впроваджувати комплекс заходів щодо забезпечення безпеки життєдіяльності. З огляду на це, основними завданнями та напрямами науково-дослідної

діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності є:

1) участь у формуванні пріоритетних напрямів та проведення прикладних наукових досліджень, а також реалізація інноваційних проєктів у галузі забезпечення пожежної безпеки, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій;

2) дослідження пожежної небезпеки будівельних конструкцій, речовин і матеріалів, випробування продукції пожежно-технічного та рятувального призначення, а також оцінку відповідності систем захисту від пожеж та інших видів надзвичайних ситуацій (Козловський, 2012);

3) дослідження пожеж та інших видів надзвичайних ситуацій, а також здійснення пожежно-технічних експертиз;

4) розроблення та вдосконалення технічних регламентів, стандартів, норм, правил та інших нормативних документів у галузі пожежної безпеки, запобігання та ліквідації надзвичайних ситуацій, а також забезпечення охорони здоров'я та праці особового складу пожежно-рятувальних підрозділів (Франчук, Пригунов, Мельник, 2017, с. 155);

5) здійснення взаємодії з освітніми, науково-дослідними установами та виробничими підприємствами, а також розвиток міжнародних зв'язків з провідними науково-дослідними установами зарубіжних країн за напрямками діяльності університету.

Основною формою науково-дослідної роботи курсантів, слухачів і студентів в університеті є їхня участь у роботі наукових організацій, які функціонують у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності, що створюються на базі кафедр, навчально-наукових комплексів (Організація наукових досліджень у сфері менеджменту та безпеки організації, 2022). Так, основними цілями та завдання наукових комплексів курсантів є:

– сприяння в реалізації прав курсантів, студентів, слухачів на здійснення науково-дослідної діяльності (Горовий, 2015);

– створення умов для розвитку наукової творчості та інтеграції в науково-освітній простір курсантів, студентів, слухачів;

– залучення талановитої молоді в наукову сферу;

– вдосконалення навичок курсантів, студентів, слухачів у самостійній науково-дослідницькій діяльності;

– впровадження результатів науково-дослідницької діяльності курсантів, студентів, слухачів в освітній процес університету (Сич, 2016).

Наукові об'єднання курсантів, студентів, слухачів у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності беруть участь в організації ефективної системи здійснення науково-дослідної діяльності; здійснюють співробітництво з науковими об'єднаннями курсантів інших ЗВО, вивчають вітчизняний і зарубіжний досвід організації науково-дослідної роботи курсантів та студентів з метою впровадження передових форм і методів у власну науково-дослідну діяльність (Франчук, 2020).

З метою формування якісно нової системи запобігання та ліквідації надзвичайних ситуацій, забезпечення пожежної безпеки (Садеков, Хлевицька, 2010), а також з метою забезпечення наукового, науково-технічного та інноваційного супроводу діяльності ДСНС на базі Львівського державного університету безпеки життєдіяльності активно впроваджуються різноманітні заходи науково-дослідної діяльності.

Так, на базі університету розроблено й впроваджено навчальну програму «Цивільний захист в умовах війни» для представників органів виконавчої влади та керівників екстрених служб з реагування на надзвичайні ситуації Європейського Союзу. Метою навчальної програми «Цивільний захист в умовах війни» є обмін досвідом роботи підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану та налагодження комунікацій з пожежно-рятувальними (аварійно-рятувальними) службами країн Європейського союзу та міжнародними партнерами. Основними модулями програми є:

1. Організація заходів цивільного захисту в умовах воєнного стану.

2. Реагування на надзвичайні ситуації в умовах воєнного стану.

3. Психологічне забезпечення в умовах воєнного стану.

Не менш важливим є *науково-інноваційний напрям* науково-дослідної діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, який спрямовується на дослідження та розробку новітніх технологій з метою створення безпекового середовища в суспільстві. Основна його мета – створення безпеково-орієнтованих рішень для формування

стійкого безпекового середовища (враховуючи положення Стратегії громадської безпеки та цивільного захисту України). Орієнтований результат – впровадження цифрових інноваційних рішень, які підвищать рівень безпекового середовища в нашій державі та забезпечать колонізацію суспільства і рятувальних служб щодо реагування на надзвичайні ситуації (воєнного характеру).

В Університеті також створено Центр дослідження пожеж у природних екосистемах, основними напрямками діяльності якого є:

1) подача проєктних грантових пропозицій в тому числі в рамках механізму цивільного захисту Європейського Союзу;

2) розробка рекомендацій щодо ризиків виникнення пожеж на атомних системах в Чорнобильській зоні;

3) використання лабораторної бази закладів вищої освіти для спільних наукових досліджень.

Також з огляду на повномасштабне вторгнення та визнання України однією з найбільш замінованих країн світу актуалізується необхідність протимінної діяльності. З цією метою в Університеті передбачено започаткування мультивекторної підготовки:

– створено кафедру протимінної діяльності, на якій здійснюється підготовка фахівців

підрозділів ДСНС України на бакалаврському рівні освіти;

– ліцензовано освітню програму підготовки магістрів «Управління піротехнічними роботами та протимінною діяльністю»;

– організовано підготовку особового складу служби цивільного захисту за програмою «Організація піротехнічних робіт»;

– організовано навчальні локації: обстеження ґрунтової дороги; обстеження місцевості на декупованих територіях; захист критичної інфраструктури; обстеження покинутих територій.

Висновки. В умовах активної інтеграції курсантів, студентів і слухачів у науково-дослідницьку діяльність реалізується можливість детальнішого і глибшого вивчення навчальних дисциплін, вироблення творчих умінь у вирішенні різного роду завдань, освоєння методів і форм роботи з літературою, оволодіння навичками проведення експериментальної роботи. Таким чином, розвиток мотивації курсантів, студентів і слухачів до науково-дослідницької діяльності є важливою умовою для формування розуміння її значущості не лише в навчальній та пізнавальній діяльності освітнього процесу, а й загалом у професійній діяльності майбутніх фахівців Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бакуменко В., Чала Н., Цедік М. До питання оцінювання наукових результатів українських учених. *Збірник наукових праць Національної академії державного управління при Президентові України*. 2021. Вип. 1. С. 15–26.
2. Горовий В. Критерії якості наукових досліджень у контексті забезпечення національних інтересів. *Вісник НАН України*. 2015. № 6. С. 74–80.
3. Зацерковний В. І., Тішаєв В. І., Демидов В. К. Методологія наукових досліджень: навч. посіб. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2017. 236 с.
4. Козловський Ю. М. Теоретико-методологічні основи моделювання наукової діяльності вищого навчального закладу: дис. ... доктора пед. наук: 13.00.01 / Ю. М. Козловський. Львів, 2012. 600 с.
5. Коваль І. С. Діяльнісний та компетентнісний підходи до неперервного саморозвитку майбутніх рятувальників. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2023. Вип. 3(140). С. 17–23.
6. Козяр М. М., Коваль І. С. Конкретно-наукові підходи до формування професійної готовності рятувальників. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми*. 2018. № 52. С. 28–31.
7. Козяр М. М., Коваль І. С. Психопедагогіка професійно-екстремальної підготовки: навч. посіб. Львів: Вид-во ЛДУ БЖД, 2024. 504 с.
8. Львівська наукова школа безпекознавства: poradnik молодим науковцям / Р. І. Тринько, В. І. Франчук, І. О. Ревак, С. І. Мельник. Львів: Растр-7. 2020. 116 с.
9. Методологія та організація наукових досліджень: навч. посіб. / за ред. І. С. Добронравової (ч. 1), О. В. Руденко (ч. 2). К.: ВПЦ «Київський університет», 2018. 607 с.
10. Організація наукових досліджень у сфері менеджменту та безпеки організації: підручник / В. Бліхар та ін. Хмельницький: Вид-во ХУУП імені Леоніда Юзькова, 2022. 443 с.
11. Садеков А. А., Хлевицька Т. Б. Теоретико-методологічні засади феномену безпеки. *Вісник економічної науки України*. 2010. № 2. С. 125–128.

12. Сич Т. Роль методології в процесі розвитку науки. *Гірська школа українських Карпат*. 2016. № 14. С. 74–78.
13. Франчук В. І. Теорія безпеки соціальних систем: підручник. 2-ге вид., перероб. і допов. Львів; Одеса : Фенікс, 2020. 224 с.
14. Франчук В. І., Пригунов П. Я., Мельник С. І. Безпекова діяльність: системний підхід. *Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ*. 2017. № 1. С. 154–163.
15. Шишкіна Є. К., Носирєв О. О. Методологія наукових досліджень: навч. посіб. Х. : Вид-во «Діса плюс», 2014. 200 с.

REFERENCES:

1. Bakumenko, V., Chala, N., & Tsedik, M. (2021). Do pytannia otsiniuvannia naukovykh rezultativ ukrainskykh uchenykh [On the issue of evaluating the scientific results of Ukrainian scientists]. *Collection of scientific papers of the National Academy of Public Administration under the President of Ukraine*, 1, 15–26 [in Ukrainian].
2. Horovyi, V. (2015). Kryterii yakosti naukovykh doslidzhen u konteksti zabezpechennia natsionalnykh interesiv [Criteria for the quality of scientific research in the context of ensuring national interests]. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 6, 74–80 [in Ukrainian].
3. Zatserkovnyi, V. I., Tishaiev, V. I., & Demydov, V. K. (2017). *Metodolohiia naukovykh doslidzhen: navch. posib.* [Methodology of scientific research: a textbook]. Nizhyn : NDU im. M. Hoholia, 236 [in Ukrainian].
4. Kozlovskiy, Yu. M. (2012). *Teoretyko-metodolohichni osnovy modeliuvannia naukovoï diialnosti vyshchoho navchalnoho zakladu* [Theoretical and methodological bases of modelling the scientific activity of a higher educational institution]. PhD: 13.00.01. Lviv, 600 [in Ukrainian].
5. Koval, I. S. (2023). Diialnisnyi ta kompetentnisnyi pidkhody do neperervnoho samorozvytku maibutnikh riaturalnykhiv [Activity and competence approaches to the continuous self-development of future rescuers]. *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 3 (140), 17–23. [in Ukrainian].
6. Koziar, M. M., & Koval, I. S. (2018). Konkretno-naukovi pidkhody do formuvannia profesiinoi hotovnosti riaturalnykhiv [Specific scientific approaches to the formation of professional readiness of rescuers]. *Modern information technologies and innovative teaching methods in the training of specialists: methodology, theory, experience, problems*. 52. S. 28–31 [in Ukrainian].
7. Koziar, M. M., & Koval, I. S. (2024). *Psykhopedahohika profesiino-ekstremalnoi pidhotovky: navch. posib.* [Psychopedagogy of professional and extreme training: a textbook]. Lviv : Vyd-vo LDU BZhD, 504 [in Ukrainian].
8. Trynko, R. I., Franchuk, V. I., Revak, I. O., & Melnyk, S. I. (2020). *Lvivska naukova shkola bezpekoznavstva: poradnyk molodym naukovtsiam* [Lviv Scientific School of Security Studies: a guide for young scientists]. Lviv : Rastr-7, 116 [in Ukrainian].
9. Dobronravovoi, I. S. (ch. 1), & Rudenko, O. V. (ch. 2). (Ed.) (2018). *Metodolohiia ta orhanizatsiia naukovykh doslidzhen: navch. posib.* [Methodology and organization of scientific research: a textbook]. K. : VPTs “Kyivskiyi universytet”, 607 [in Ukrainian].
10. Blikhar, V. (Ed.) (2022). *Orhanizatsiia naukovykh doslidzhen u sferi menedzhmentu ta bezpeky orhanizatsii: pidruchnyk* [Organization of scientific research in the field of management and security of the organization: a textbook]. Khmelnytskyi : Vyd-vo KhUUP imeni Leonida Yuzkova, 443 [in Ukrainian].
11. Sadekov, A. A., & Khlevytska, T. B. (2010). Teoretyko-metodolohichni zasady fenomenu bezpeky. *Bulletin of Economic Science of Ukraine*, 2, 125–128 in Ukrainian].
12. Sych, T. (2016). Rol metodolohii v protsesi rozvytku nauky. *Mountain School of the Ukrainian Carpathians*, 14, 74–78 [in Ukrainian].
13. Franchuk, V. I. (2020). *Teoriia bezpeky sotsialnykh system: pidruchnyk* [Theory of security of social systems: a textbook]. 2-he vyd., pererob. i dopov. Lviv; Odesa : Feniks, 224 [in Ukrainian].
14. Franchuk, V. I., Pryhunov, P. Ya., & Melnyk, S. I. (2017). Bezpekova diialnist: systemnyi pidkhid [Security activities: a systematic approach]. *Scientific Bulletin of the Lviv State University of Internal Affairs*, 1, 154–163 [in Ukrainian].
15. Shyshkina, Ye. K., & Nosyriev, O. O. (2014). *Metodolohiia naukovykh doslidzhen: navch. posib.* [Methodology of scientific research: a teaching aid]. Kh. : Vyd-vo “Disa plus”, 200 [in Ukrainian].

УДК 371.68:004.9

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-16>

Ольга ПОВОРОЗНЮК

начальник відділення комунікації 143 Об'єднаного навчально-тренувального центру «ПОДІЛЛЯ» Сил підтримки Збройних Сил України, вул. Степана Бандери, 56, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька область, Україна, 32302

ORCID: 0009-0003-9240-8125

Бібліографічний опис статті: Поворознюк, О. (2025). Теоретичне обґрунтування педагогічних умов формування готовності майбутніх саперів (розмінування) до професійної діяльності в умовах інформатизації. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 124–129, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-16>

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕДАГОГІЧНИХ УМОВ ФОРМУВАННЯ ГОТОВНОСТІ МАЙБУТНІХ САПЕРІВ (РОЗМІНУВАННЯ) ДО ПРОФЕСІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В УМОВАХ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ

Суть інноваційних підходів у військовій освіті – успішне поєднання нових технологій і мінливих педагогічних запитів в умовах повномасштабної російсько-української війни. Інформаційні технології у військовій освіті передбачають нововведення в організації освіти з використанням сучасних технологічних засобів, насамперед комп'ютерної техніки. Узагальнено, що підготовку майбутніх саперів (розмінування), які щодня братимуть участь у небезпечних місіях, необхідно здійснювати на найвищому рівні, а використання сучасного обладнання та інформаційних технологій забезпечать безпечніше та ефективніше виконання робіт. Для цього в навчально-тренувальних центрах потрібно створити такі умови, які б передбачали поєднання традиційної базової загальновійськової підготовки з інноваційними програмами віртуальної реальності, розробленими для навчання основам безпечного поводження з вибухонебезпечними предметами і навичкам розмінування. Метою статті є окреслення перспективних шляхів використання інформаційних технологій як інструменту формування готовності майбутніх саперів (розмінування) до професійної діяльності.

У статті теоретично обґрунтовано педагогічні умови формування готовності майбутніх саперів (розмінування) до професійної діяльності в умовах інформатизації: залучення викладацького (інструкторського) складу із бойовим досвідом; забезпечення відповідної матеріально-технічної бази; вдосконалення науково-методичного забезпечення освітнього процесу; створення віртуального освітнього середовища підготовки майбутніх саперів (розмінування) на основі інтеграції інноваційних технологій. Підсумовано, що розглядати окреслену проблематику можливо лише як комплекс педагогічних умов у їхньому взаємозв'язку та взаємодоповнюваності.

Ключові слова: інформатизація, навчально-тренувальний центр, майбутні сапери (розмінування), готовність до професійної діяльності, інформаційні технології, педагогічні умови.

Olha POVOROZNIUK

Head of the Communication Department of the 143rd Joint Training Center “PODILLYA” of the Support Forces of the Armed Forces of Ukraine, 56 Stepana Bandery str., Kamianets-Podilskyi, Khmelnytsk region, Ukraine, 32302

ORCID: 0009-0003-9240-8125

To cite this article: Povorozniuk, O. (2025). Teoretychne obgruntuvannia pedahohichnykh umov formuvannia hotovnosti maibutnikh saperiv (rozminuvannia) do profesiinoi diialnosti v umovakh informatyzatsii [Theoretical justification of pedagogical conditions for forming the professional readiness of future sappers (demining) under the conditions of informatisation]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 124–129, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-16>

THEORETICAL JUSTIFICATION OF PEDAGOGICAL CONDITIONS FOR FORMING THE PROFESSIONAL READINESS OF FUTURE SAPPERS (DEMINING) UNDER THE CONDITIONS OF INFORMATISATION

The essence of innovative approaches in military education lies in the successful combination of new technologies and evolving pedagogical demands under the conditions of the full-scale Russian-Ukrainian war. Information technologies in military education involve innovations in the organisation of education through the use of modern technological tools, primarily computer equipment. It has been generalised that the training of future sappers (deminers), who will daily participate in dangerous missions, must be carried out at the highest level, and the use of modern equipment and information technologies will ensure safer and more effective task performance. To achieve this, training centres should create conditions that combine traditional general military training with innovative virtual reality programmes developed to teach the basics of safe handling of explosive devices and demining skills. The aim of the article is to outline promising directions for the use of information technologies as a tool for forming the professional readiness of future sappers (deminers).

The article theoretically substantiates the pedagogical conditions for forming the professional readiness of future sappers (deminers) under the conditions of informatisation: the involvement of teaching (instructor) staff with combat experience; provision of appropriate material and technical resources; improvement of the scientific and methodological support of the educational process; creation of a virtual educational environment for training future sappers (deminers) based on the integration of innovative technologies. It is concluded that the given issue should be considered only as a complex of pedagogical conditions in their interconnection and complementarity.

Key words: informatization, training centre, future sappers (deminers), professional readiness, information technologies, pedagogical conditions.

Актуальність проблеми. В умовах повномасштабної російсько-української війни підготовка майбутніх військових фахівців, зокрема й саперів (розмінування), набуває особливої значущості. Тому на сучасному етапі розвитку Збройних сил України (ЗСУ) особливі вимоги висуваються до рівня професійної майстерності військових фахівців, які повинні відмінно знати матеріальну частину озброєння і техніки, компетентно їх експлуатувати та мати високу методичну підготовку. Водночас, завдання професійної діяльності сапера передбачають виконання завдань в екстремальних, небезпечних для життя ситуаціях, на відкритій місцевості незалежно від часу доби та погодних умов (Родіков, 2015, с. 42). У цьому контексті важливо, щоб майбутні сапери були готовими здійснювати професійну діяльність на високому рівні. Це зумовлює необхідність пошуку інноваційних форм і методів підготовки майбутніх саперів (розмінування) з урахуванням тенденцій стрімкої інформатизації військової справи та скороченого часу підготовки в навчально-тренувальних центрах.

Із поглибленням процесів інформатизації суспільства розширилися можливості підвищення ефективності управлінських процесів у різних сферах життєдіяльності. Військова галузь не стала винятком, адже реальна потреба скорочення витрат та часу на підготовку майбутніх саперів (розмінування) в умовах

повномасштабної війни не допускає зниження її якості. Тому питанням підвищення ефективності підготовки майбутніх саперів (розмінування) приділяється значна увага не лише в Україні, а й провідних західних державах.

Іншим важливим чинником інтенсифікації процесів управління є прагнення досягти всеосяжної переваги над противником шляхом випередження його в діях і виробленні рішень (Njeri, 2022, с. 110). Цей підхід базується на необхідності досягнення інформаційної переваги, на базі глобальної і масштабованої ситуаційної обізнаності в реальному масштабі часу. На думку низки американських військових фахівців, формування Збройних сил ХХІ століття повинно відбуватися не на базі наявних систем зброї (як це відбувається зараз), а на основі, передусім, інформації, яка дає змогу командирам повною мірою реалізовувати їхні можливості (Oladunjoye, Maffattone, Al-Nawal, Fasullo, & Clayton, 2022). Тому використання інноваційних рішень підготовки майбутніх саперів (розмінування), які базуються на використанні сучасних інформаційних та цифрових технологій, є надзвичайно актуальною та своєчасною проблемою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Актуальність дослідження процесу формування готовності військових фахівців, зокрема й майбутніх саперів (розмінування), до професійної діяльності підтверджується зростанням

кількості досліджень, присвячених цій темі. Науковцями розглянуто інноваційні технології навчання у вищій військовій освіті (В. Горбунов (2021), Г. Зміївський (2021), А. Моца (2017) та ін.), здійснено аналіз світових технологічних трендів у військовій сфері (Т. Писаренко (2021)), інноваційні аспекти підготовки майбутніх саперів з урахуванням вимог сьогодення (М. Зубаль (2018), Д. Окіпняк (2018), А. Окіпняк (2018), В. Родіков (2015) та ін.) та з використанням віртуальної реальності (Л. Ханса (L. Khansa) (2021), Е. Саада, (E. Saada) (2021), Р. Маалуф (R. Maalouf) (2021) та ін.), організаційно-педагогічні умови формування фахової компетентності майбутніх військових фахівців в умовах інформаційно-освітнього середовища ВВНЗ (І. Шумков (2024)). Однак, незважаючи на значну кількість досліджень, недостатньо вивченим залишаються педагогічні умови формування готовності майбутніх саперів (розмінування) до професійної діяльності в умовах інформатизації.

Мета статті полягає в теоретичному обґрунтуванні педагогічних умов формування готовності майбутніх саперів (розмінування) до професійної діяльності в умовах інформатизації.

Виклад основного матеріалу. В умовах високорозвинених інформаційних технологій, використання сучасних методів навчання є необхідною умовою не лише для розвитку найефективніших методів навчання, а й вдосконалення методів викладання (Моца, 2017). Тенденція інформатизації військової освіти виявляється не лише в насиченні освітнього процесу комп'ютерними засобами, а в інтелектуалізації військової сфери – розвитку інтелектуального людського ресурсу, який здатний не лише маніпулювати програмним чи апаратним забезпеченням, а й створювати математичні, інформаційні, кібернетичні моделі, які розширюють можливості комп'ютерів та ІТ-технологій, має змогу перекладати в інформаційну сферу більшість професійних завдань (Зміївський, & Горбунов, В. (2021)). Інформаційні технології у підготовці майбутніх саперів (розмінування) передбачають нововведення в організації освіти з використанням сучасних технологічних засобів, насамперед комп'ютерної техніки.

Підготовка майбутніх саперів (розмінування), які щодня братимуть участь у небезпечних місіях, має бути найвищого рівня, а сучасне

обладнання та інформаційні технології забезпечують безпечніше та ефективніше виконання робіт. Саме тому у їхній підготовці необхідно забезпечити такі педагогічні умови, які б передбачали можливість курсантам випробувати ролі сапера-вибухотехніка і фахівця з розмінування (Peleshchak, Lytvyn, Mediakov, Pukach, & Šlahor, 2023), вивчаючи деталі різних інструментів для виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів і освоюючи навички їхнього використання (Окіпняк, Окіпняк, & Зубаль, 2018). Тобто в навчально-тренувальних центрах потрібно створити такі умови, які б передбачали поєднання традиційної базової військової підготовки з інноваційними програмами віртуальної реальності (Шумков, 2024), розроблених для навчання основам безпечного поводження з вибухонебезпечними предметами і навичкам розмінування. Метою таких програм є створення командного середовища з метою вивчення спеціалізованих інженерних технік та виконання бойових вправ та реалістичного віртуального досвіду, який дасть змогу майбутнім саперам (розмінування) опанувати навички розмінування в умовах суцільного очищення місцевості від вибухонебезпечних предметів і саперного супроводу групою розмінування.

Таким чином, педагогічними умовами формування готовності майбутніх саперів (розмінування) до професійної діяльності в умовах інформатизації визначаємо: залучення викладацького (інструкторського) складу із бойовим досвідом; забезпечення відповідної матеріально-технічної бази; вдосконалення науково-методичного забезпечення освітнього процесу; створення віртуального освітнього середовища підготовки майбутніх саперів (розмінування) на основі інтеграції інноваційних технологій.

Залучення викладацького (інструкторського) складу із бойовим досвідом визначається як ключова педагогічна умова формування готовності саперів до професійної діяльності, особливо в умовах обмеженого терміну підготовки. Відзначається, що цей процес вимагає від викладачів постійного саморозвитку та вдосконалення власних компетентностей. Йдеться про вивчення та узагальнення досвіду виконання своїх обов'язків саперами, опанування сучасних зразків озброєння і техніки, досвіду участі в бойових діях, міжнародних миротворчих операціях, а також

вивчення досвіду підготовки фахівців-саперів у провідних країнах світу тощо. Важливо враховувати, що викладачі повинні мати бойовий досвід, здобутий у ході участі у бойових діях 2022–2025 років, оскільки це надає унікальні знання та практичний бойовий досвід, який вони ефективно впроваджують в освітній процес та забезпечують адаптацію підготовки саперів до реальних викликів на полі бою.

Іншою важливою педагогічною умовою є *забезпечення відповідної матеріально-технічної бази*, яка визначається активним використанням сучасних засобів та технологій для максимально ефективного навчання. Використання макетів мін та інших вибухонебезпечних предметів є важливим елементом практичної підготовки сапера.

Фільмотека, спрямована на підготовку саперів, є ключовою складовою матеріально-технічної бази. Відеоматеріали щодо будови мін, способів їх установки, знищення та знешкодження є важливим інструментом для підготовки саперів, надаючи їм можливість вивчати та вдосконалювати свої навички у безпечному та контрольованому середовищі в умовах обмеженого часу навчання у навчальних центрах Збройних Сил України.

Одним із інноваційних аспектів формування готовності саперів до професійної діяльності є застосування бойових тренажерів у вигляді мультиплеєрних ігор. Ці тренажери, моделюючи різні сценарії бойових дій та професійні завдання сапера, дозволяють курсантам відчувати реалізацію практичних навичок у віртуальному, але реалістичному середовищі, використовуючи для виконання завдань техніку та обладнання бойового комплексу сапера. Це підвищує рівень емоційної інтенсивності та відповідальності саперів, сприяючи кращому їхньому підготовчому процесу перед виконанням реальних задач на полі бою у районах ведення бойових дій.

Науково-методичне забезпечення також є важливою умовою ефективності навчання. Тому удосконалення цього компонента є надзвичайно важливим у формуванні готовності майбутніх саперів до професійної діяльності. Сучасні технології та методи саперної справи постійно змінюються і розвиваються, тому науково-методичне забезпечення повинно відображати останні досягнення у цій галузі. Сапери повинні бути ознайомлені з сучасними

засобами дистанційного та напівдистанційного розмінування, сучасними засобами виявлення вибухонебезпечних предметів та саморобних вибухових пристроїв. Науково-методичне забезпечення повинно включати в себе навчання використанню цих новітніх засобів. Обмін досвідом у межах заходів міжнародного співробітництва, досягнення взаємовідповідності з системою підготовки країн – партнерів НАТО за інженерно-саперним напрямком дозволить впроваджувати найкращі практики та стандарти у підготовку саперів. Науково-методичне забезпечення має інтегрувати цей міжнародний досвід для підняття рівня підготовки саперів.

Створення віртуального освітнього середовища підготовки майбутніх саперів (розмінування) на основі інтеграції інноваційних технологій. Швидкий розвиток технологій спричинив революцію в різних секторах військової освіти. Традиційні методи навчання доповнюються або замінюються інноваційними технологіями, такими як віртуальна реальність (VR), штучний інтелект (ШІ) та іншими інноваційними інструментами (Писаренко, 2021):

1) технологія віртуальної реальності, яка набула значного поширення у військовій освіті. Віртуальна реальність – це інноваційна технологія, яка використовує постійно зростаючу потужність комп'ютерів для моделювання реального та уявного середовища та ситуацій з високим ступенем реалізму та інтерактивності (Khansa, Saada, Maalouf, Husseini, & Baydoun, 2021). Моделювання віртуальної реальності забезпечує реалістичний і захопливий досвід навчання майбутніх саперів (розмінування), даючи змогу практикувати тактичні маневри, бойові сценарії та навички ухвалення рішень у безпечному та контрольованому середовищі. VR дає змогу військовослужбовцям тренуватися у складних ситуаціях, підвищуючи їхню ситуаційну обізнаність і можливості правильного реагування;

2) штучний інтелект відіграє ключову роль у сучасній військовій освіті, доповнюючи програми навчання інтелектуальними системами. Технології на основі штучного інтелекту можуть аналізувати величезні обсяги даних, виявляти закономірності та генерувати цінну інформацію для військовослужбовців. ШІ допомагає в плануванні сценаріїв, ухваленні стратегічних рішень і оцінці ефективності

військовослужбовців, надаючи персоналізований зворотний зв'язок для оптимізації діяльності;

3) інші інноваційні технології – доповнена реальність (AR) для накладення цифрової інформації на реальний світ, пристрої для моніторингу біометричних даних і продуктивності військовослужбовців, дрони для тактичної розвідки і симулятори для реалістичного навчання транспортних засобів і обладнання. Усі ці інструменти пропонують розширені можливості для підготовки майбутніх саперів (розмінування), ефективність та економічність.

Створення віртуального освітнього середовища підготовки майбутніх саперів (розмінування) на основі інтеграції інноваційних технологій забезпечує:

- реалістичне та безпечне навчання: віртуальна реальність і симулятори створюють реалістичне середовище навчання без ризику для життя та ресурсів, даючи змогу майбутнім саперам (розмінування) неодноразово відпрацьовувати складні сценарії в безпечних умовах;
- підвищена ситуаційна обізнаність: технології віртуальної реальності та штучного інтелекту допомагають майбутнім саперам (розмінування) розвивати ситуаційну обізнаність, відтворюючи умови реального світу та готуючи їх до динамічних і непередбачуваних ситуацій;
- персоналізоване навчання: системи на базі штучного інтелекту дають змогу

аналізувати дані про індивідуальні результати, визначати сфери для оптимізації та надавати індивідуальні навчальні модулі для підвищення навичок і можливостей майбутніх саперів (розмінування);

– економічна ефективність: інтеграція технологій знижує потребу в дорогих фізичних ресурсах і обладнанні, роблячи програми навчання більш економічно ефективними в довгостроковій перспективі.

Таким чином, педагогічні умови формування готовності майбутніх саперів (розмінування) до професійної діяльності в умовах інформатизації є своєрідним поєднанням елементів, що забезпечують досягнення запланованого результату – сформованості їхньої готовності до військово-професійної діяльності. Ефективним педагогічними умовами формування готовності майбутніх саперів (розмінування) до професійної діяльності в умовах інформатизації визначено: залучення викладацького (інструкторського) складу із бойовим досвідом; забезпечення відповідної матеріально-технічної бази; вдосконалення науково-методичного забезпечення освітнього процесу; створення віртуального освітнього середовища підготовки майбутніх саперів (розмінування) на основі інтеграції інноваційних технологій. Розглядати окреслену проблематику можливо лише як комплекс педагогічних умов у їхньому взаємозв'язку та взаємодоповнюваності.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Зміївський Г., Горбунов В. Особливості впровадження мультимедійних технологій у військову освіту. *Новий колегіум*. 2021. Вип. 166. С. 36–40.
2. Моца А. А. Інноваційні технології навчання у вищій військовій освіті України: практичне застосування. *Воєнні науки. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2017. № 5(27). С. 26–34.
3. Окіпняк Д. А., Окіпняк А. С., Зубаль М. В. Педагогічні аспекти підготовки майбутніх фахівців із розмінування з урахуванням вимог сьогодення. *Вісник Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія: Фізичне виховання, спорт і здоров'я людини*. 2018. Вип. 11. С. 274–282.
4. Писаренко Т. В. Аналіз світових технологічних трендів у військовій сфері: монографія. К.: УкрІНТЕІ, 2021. 110 с.
5. Родіков В. Г. Розвиток професійної компетентності саперів у процесі підвищення кваліфікації: дис. ... канд. пед. наук : 13.00.04. Хмельницький, 2015. 263 с.
6. Шумков І. Організаційно-педагогічні умови формування фахової компетентності майбутніх офіцерів військової розвідки в умовах інформаційно-освітнього середовища ВВНЗ. *Актуальні питання гуманітарних наук*. 2024. Вип. 71 (3). С. 315–319.
7. Khansa, L., Saada, E., Maalouf, R., Husseini, M., Baydoun, M. A Virtual Reality Application for the Training of Deminers. *The journal of conventional weapons destruction*. 2021. Vol. 25. P. 97–101.
8. Njeri S. Examining mine action's 'peaceability' potential through everyday narratives and practices in Somaliland. *Journal of the British Academy*. 2022. Vol. 10 (s1). P. 109–133.
9. Oladunjoye O., Maffattone C., Al-Nawal J., Fasullo S., Clayton, G. Omnidirectional all-terrain screw-driven robot design, modeling, and application in humanitarian demining. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55 (27). P. 7–12.

10. Peleshchak R., Lytvyn V., Mediakov O., Pukach P., Šlahor L. Small military and industrial under-surface objects detection using data from the UWB GPR, MLP filter, and oscillatory neural network. 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2752593/v1>

REFERENCES:

1. Zmiiivskiy, H., & Horbunov, V. (2021). Osoblyvosti vprovadzhennia multymediinykh tekhnolohii u viiskovu osvitu [Features of the introduction of multimedia technologies into military education]. *Novyi kolehium – New Collegium*, 166, 36–40 [in Ukrainian].
2. Motsa, A. A. (2017). Innovatsiini tekhnolohii navchannia u vyshchii viiskovii osviti Ukrainy: praktychne zastosuvannia. Voienni nauky [Innovative learning technologies in higher military education of Ukraine: practical application. Military sciences]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal "Internauka" – International scientific journal "Internauka"*, 5 (27), 26–34 [in Ukrainian].
3. Okipniak, D. A., Okipniak, A. S., & Zubal, M. V. (2018). Pedahohichni aspekty pidhotovky maibutnikh fakhivtsiv iz rozminuvannia z urakhuvanniam vymoh sohodennia [Pedagogical aspects of training future demining specialists taking into account the requirements of today]. *Visnyk Kamianets-Podilskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Ohienka. Seriya: Fizychnye vykhovannia, sport i zdorovia liudyny – Bulletin of Kamianets-Podilskyi National University named after Ivan Ohienko. Series: Physical education, sports and human health*, 11, 274–282 [in Ukrainian].
4. Pysarenko, T. V. (2021). *Analiz svitovykh tekhnolohichnykh trendiv u viiskovii sferi [Analysis of world technological trends in the military sphere]: monohrafiia*. K. : UkrINTEL, 110 [in Ukrainian].
5. Rodikov, V. H. (2015). *Rozvytok profesiinoi kompetentnosti saperiv u protsesi pidvyshchennia kvalifikatsii [Development of professional competence of sappers in the process of advanced training]: dys. ... kand. ped. nauk: 13.00.04*. Khmelnytskyi, 263 [in Ukrainian].
6. Shumkov, I. (2024). Orhanizatsiino-pedahohichni umovy formuvannia fakhovoi kompetentnosti maibutnikh oftseriv viiskovoi rozvidky v umovakh informatsiino-osvitnoho seredovyshcha VVNZ [Organizational and Pedagogical Conditions for the Formation of Professional Competence of Future Military Intelligence Officers in the Information and Educational Environment of a Military Intelligence University]. *Aktualni pytannia humanitarnykh nauk – Topical Issues of Humanities*, 71 (3), 315–319 [in Ukrainian].
7. Khansa, L., Saada, E., Maalouf, R., Husseini, M., & Baydoun, M. (2021). A Virtual Reality Application for the Training of Deminers. *The journal of conventional weapons destruction*. 25. 97–101.
8. Njeri, S. (2022). Examining mine action's 'peaceability' potential through everyday narratives and practices in Somaliland. *Journal of the British Academy*, 10 (s1), 109–133.
9. Oladunjoye, O., Maffattone, C., Al-Nawal, J., Fasullo, S., & Clayton, G. M. (2022). Omnidirectional all-terrain screw-driven robot design, modeling, and application in humanitarian demining. *IFAC-PapersOnLine*, 55 (27), 7–12.
10. Peleshchak, R., Lytvyn, V., Mediakov, O., Peleshchak, I., Pukach, P., & Šlahor, L. (2023). Small military and industrial under-surface objects detection using data from the UWB GPR, MLP filter, and oscillatory neural network. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2752593/v1>

УДК 378.14:355/359(477)

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-17>

Volodymyr RODIKOV

Candidate of Pedagogic Sciences, Colonel, Chief of the 143rd Joint Training Center “PODILLYA” of the Support Forces of the Armed Forces of Ukraine, 50 Hrushevskiy ave., Kamianets-Podilskyi, Khmelnytsky region, Ukraine, 32302

ORCID: 0009-0006-8683-359X

To cite this article: Rodikov, V. (2024). Spetsyfyka osvithnoho seredovyscha fakhovoi pidhotovky serzhantskoho i riadovoho skladu inzhenernykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy [Specifics of the Educational Environment for the Professional Training of Sergeant and Enlisted Personnel of the Engineering Troops of the Armed Forces of Ukraine]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 130–135, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-17>

SPECIFICS OF THE EDUCATIONAL ENVIRONMENT FOR THE PROFESSIONAL TRAINING OF SERGEANT AND ENLISTED PERSONNEL OF THE ENGINEERING TROOPS OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE

The article examines the educational environment of military education institutions (training centres) that provide professional training for sergeant and enlisted personnel of the engineering troops of the Armed Forces of Ukraine, as an important factor in the comprehensive development of cadets' personalities. It has been established that the effectiveness and efficiency of personal, professional, and service-combat development of sergeant and enlisted personnel of the engineering troops directly depends on the developmental potential of the educational environment of training centres and on the nature of the interaction between the cadet as an active subject and all components of this environment.

The educational environment of training centres (units), in the context of the professional training of sergeant and enlisted personnel of the engineering troops, is considered as a pedagogically organised system of conditions, influences and opportunities that operates within the space of the training centre (unit) and is implemented through specially designed pedagogical technologies that ensure the full integration of cadets into all types of military-professional activity.

The studied educational environment is structured as a set of microsystems – certain material and immaterial subsystems of the internal educational environment of the training centres. Within the structure of military education institutions (training centres) that provide professional training for sergeant and enlisted personnel of the engineering troops of the Armed Forces of Ukraine, the following microsystems have been identified: didactic, practice-oriented, digital, health-preserving, social, and educational. Each of these microsystems is based on a structural framework comprising spatial-object (“space of things”), activity-related (“space of actions”), and subject-social (“space of relations”) components of the educational environment.

Key words: educational environment, professional training, sergeant and enlisted personnel, engineering troops, cadets, microsystem.

Володимир РОДІКОВ

кандидат педагогічних наук, полковник, начальник 143 Об'єднаного навчально-тренувального центру «ПОДІЛЛЯ» Сил підтримки Збройних Сил України, просп. Грушевського, 50, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька область, Україна, 32302

ORCID: 0009-0006-8683-359X

Бібліографічний опис статті: Родіков, В. (2025). Специфіка освітнього середовища фахової підготовки сержантського і рядового складу інженерних військ Збройних Сил України. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 130–135, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-17>

СПЕЦИФІКА ОСВІТНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ФАХОВОЇ ПІДГОТОВКИ СЕРЖАНТСЬКОГО І РЯДОВОГО СКЛАДУ ІНЖЕНЕРНИХ ВІЙСЬК ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

У статті розглянуто освітнє середовище закладів військової освіти (навчально-тренувальних центрів), які здійснюють фахову підготовку сержантського і рядового складу інженерних військ Збройних Сил України як важливий чинник всебічного розвитку особистості курсантів. Встановлено, що результативність та ефективність особистісного, професійного, службово-бойового становлення сержантського і рядового складу інженерних військ безпосередньо залежить від розвиваючого потенціалу освітнього середовища навчально-тренувальних центрів та від специфіки взаємодії курсанта як активного суб'єкта з усіма компонентами цього середовища. Освітнє середовище навчально-тренувальних центрів (частин) в контексті фахової підготовки сержантського і рядового складу інженерних військ розглянуто як педагогічно організовану систему умов, впливів і можливостей, що функціонує в просторі навчально-тренувального центру (частини), реалізується за допомогою спеціально створених педагогічних технологій, які забезпечують повноцінну інтеграцію курсантів в усі види військово-професійної діяльності. Досліджуване освітнє середовище структуровано як сукупність мікросередовищ – певної матеріальної і нематеріальної підсистеми внутрішнього освітнього середовища навчально-тренувальних центрів. У структурі закладів військової освіти (навчально-тренувальних центрів), які здійснюють фахову підготовку сержантського і рядового складу інженерних військ Збройних Сил України виокремлено такі мікросередовища: дидактичне, практико-зорієнтоване, цифрове, здоров'язбережувальне, соціальне, виховне. Кожне з мікросередовищ базується на структурному каркасі у вигляді просторово-предметного («простір речей»), діяльнісного («простір дій») і суб'єктно-соціального («простір відносин») компонентів освітнього середовища.

Ключові слова: освітнє середовище, фахова підготовка, сержантський і рядовий склад, інженерні війська, курсанти, мікросередовище.

Relevance of the problem. In the context of the Russian-Ukrainian war, which results in enormous losses not only of material resources but also of qualified human resources, the urgent need has arisen for the constant maintenance of high combat readiness of military units and subdivisions of the Armed Forces of Ukraine, as well as the rapid restoration of their combat capability following hostilities (Korol, Lutsyshyn, Korol, 2024, p. 183). This, above all, requires the organisation of high-quality individual and collective training and the provision of a high level of professionalism among engineering troops specialists. The performance of combat missions in the current conditions of full-scale Russian-Ukrainian war sets higher requirements for their level of professional readiness. It is necessary, within a short time frame, to ensure the transition from the reproduction of acquired knowledge to its active assimilation, aimed at the development of tactical thinking and creative abilities, the formation of skills for competent comprehensive assessment of the situation, and the making of optimal, well-grounded decisions.

The professional training of cadets – sergeant and enlisted personnel (SEP) of the engineering troops – is a crucial component of the educational process. Under current conditions, there is a need to implement new approaches aimed at optimising and improving the professional level

of cadets. A significant improvement in the quality of professional training of SEP in engineering troops for professional activities is possible under conditions of practical training that are as close as possible to real service-combat situations, which is especially important for engineering specialists whose profession involves life-threatening risks.

The improvement of the educational process in military education is implemented with regard to trends in the development of modern military education, including its growing mass character, continuity, and the introduction of new learning technologies. Interest in research in the field of military education, based on the interpretation of the educational environment, underpins changes in society and the orientation of education towards a competence-based approach (Honcharenko & Mykhailova, 2016). The educational environment has a fundamental impact on the development of a competent personality, enabling the cadet to realise their place in the military-professional sphere (Ostapchuk, 2022). Therefore, it is very important to identify the potential of military educational institutions and the educational environment as a means of forming the social, professional, and personal qualities of SEP in engineering troops.

Analysis of recent research and publications. The relevance of researching the impact of the educational environment in military education institutions on the quality of training for military

specialists is confirmed by the growing number of studies dedicated to this topic. Scholars have examined the theory and practice of forming and improving the educational environment in higher military aviation education institutions (O. Marchenko, 2018; T. Plachynda, 2019); the specifics of the informational-educational environment of higher military education institutions (L. Panchenko, 2010; I. Shumkov, 2024); global theory and practice of shaping the educational environment in higher education institutions with specific learning conditions (O. Fedorenko & O. Marchenko, 2023), among others. Ukrainian researchers have also paid attention to foreign experience in organising the educational environment in military education institutions (I. Honcharenko, 2016; Yu. Mykhailova, 2016; R. Misheniuk, 2022), among others.

However, within the outlined research, issues concerning the renewal and structuring of the educational environment of training centres in the context of professional training for sergeant and enlisted personnel (SEP) of engineering troops remain insufficiently addressed. In addition, the role of the educational environment in modernising the training of future engineering troops specialists under martial law – characterised by time constraints for preparing personnel to quickly and effectively complete combat missions – also requires further investigation.

The aim of the article is to examine the specifics of the organisation and potential of the educational environment of military training centres in the professional training of sergeant and enlisted personnel of the engineering troops of the Armed Forces of Ukraine.

Research methods include theoretical analysis of scientific literature on the subject to select and interpret didactic material; and critical-analytical analysis of concepts, theories, and methodologies to identify ways of addressing the research problem.

Presentation of the main material. Like any other environment, the educational environment in its generalised form is a set of various conditions and subjects, united by a commonality, which can either promote or hinder personal development. In pedagogical theory and practice, the term “environment” is widely used – e.g. “educational institution environment”, “learning environment” (O. Marchenko, 2018; L. Panchenko, 2010; I. Shumkov, 2024, et al.). In Ukrainian pedagogical

science, the concept of “educational environment” has been actively studied since the 1990s.

As T. Plachynda rightly notes, the educational environment is a system of structural (goals, instructor-teaching staff, pedagogically interpreted information, systems of educational, professional, or other activity, means of pedagogical communication, criteria for quality assessment and indicators of development of this system, etc.) and functional (projective, gnoseological, constructive, prognostic, organisational, communicative, evaluative) components (Plachynda, 2019, p. 124).

According to L. Tsapovska, a competence-based educational environment should be viewed as an educational institution’s environment comprising a set of components: internal orientation of the institution, specific values, ideas, tasks; the moral-psychological climate of the institution; educational technologies used in the process; psychological characteristics of educational subjects; tools chosen by the institution to address general cultural tasks; differentiated perceptions of students by teachers; the socio-psychological structure of the teaching staff; the psychological component of the knowledge transfer process (Tsapovska, 2020, p. 126). Thus, the competence-based educational environment is a stable polystructural system of direct and indirect educational influences through which psychological-pedagogical principles, methods, tools, goals, objectives, and forms are implemented within the educational institution.

The main capabilities of the educational environment in the professional training of sergeant and enlisted personnel (SEP) in the engineering troops include: use of all types of information resources and services; secure access to verified content for solving educational tasks; methodological support and guidance for designing and planning various educational activities; support for both criteria-based and formative assessment; all forms of information work, as well as the organisation and support of remote interaction between all participants in the educational process.

The educational environment of military education institutions (training centres) is characterised by its *isolation and closure*. Every military unit, including training centres, is located within a fenced-off area with restricted entry and exit. Cadets are not allowed to use smartphones or the internet during classes. Limited internet access is compensated for by the existence of the

institution's electronic educational environment, which contains all necessary learning materials. During classes and independent work, controlled internet access is provided in designated classrooms and information (computer) labs.

Thus, the specificity of military education institutions (training centres) represents a unique and complex characteristic that defines the structure, content, and dynamics of statutory and professional demands and relationships among all participants in the training process. This allows for adopting the definition of the educational environment of military education institutions as proposed by O. Fedorenko and O. Marchenko: "...a complex of socio-pedagogical conditions, staffing, material and technical resources, educational-methodical support, rules, traditions, value orientations, corporate norms, the state of the moral-psychological climate, and relationships that directly or indirectly affect the personal development of cadets and their integration into military corporate culture through the fulfilment of duties, upbringing, and self-development" (Fedorenko & Marchenko, 2023).

In its broadest sense, the educational environment of training centres (units) in the context of the professional training of SEP in the engineering troops includes didactic materials, programmes, methodologies, teaching and instructional staff. It also encompasses digital and virtual components (such as various types of simulators) as well as military-professional components. During their education in military institutions, cadets undergo training not only in their specialisation but also through all stages of military and military-special training, gaining the knowledge, skills, and abilities required for military service, particularly in sergeant positions. Cadets carry out active military service, initially under conscription and subsequently under contract (Misheniuk, 2022, p. 193). This imposes a certain level of responsibility on servicemen and the necessity to perform their military duties as determined by Ukrainian law and departmental legislative acts.

The educational environment for the professional training of SEP in the engineering troops of the Armed Forces of Ukraine is viewed as a set of microsystems – material and non-material subsystems of the internal educational environment of training centres (units). Within the structure of military education institutions that provide professional training for SEP of the

engineering troops of the Armed Forces of Ukraine, the following microsystems are identified: didactic, practice-oriented, digital, health-preserving, social, and educational.

Each of these microsystems within the training centre is based on a structural framework consisting of: a spatial-object component ("space of things"), an activity-based component ("space of actions"), and a subject-social component ("space of relationships") (see Table 1). In their interconnection, all microsystems and components of the educational environment for SEP training are aimed at developing in cadets the knowledge, skills, and abilities necessary for military service in designated positions.

Thus, the educational environment of military education institutions (training centres) that provide professional training for sergeant and enlisted personnel (SEP) of the engineering troops of the Armed Forces of Ukraine is a multidimensional, complexly structured phenomenon – a set of specific microsystems (didactic, practice-oriented, digital, educational, health-preserving, and social). Each microsystem of the training centre is based on a structural framework composed of spatial-object ("space of things"), activity-based ("space of actions"), and subject-social ("space of relationships") components.

Conclusions. The planning of professional training for SEP in the engineering troops of the Armed Forces of Ukraine within the educational environment of training centres, considering the specifics of their activities, is carried out exclusively in accordance with regulatory documents, statutes, and instructions, which do not allow changes to the content. Taking into account the specifics of the educational environment of military education institutions (training centres) makes it possible to effectively structure the professional training process for SEP of engineering specialties in the Armed Forces of Ukraine.

At the same time, the influence of the regulated military educational environment can be both negative and positive. On the one hand, the closed nature of training centres may hinder the implementation of information technologies and innovative methodologies. On the other hand, the stability of the military educational environment within training centres contributes to the effectiveness of the organised and predictable process of professional training for SEP in the engineering troops.

Table 1

Structural Components of the Educational Environment in Military Education Institutions Providing Professional Training for Sergeant and Enlisted Personnel of the Engineering Troops of the Armed Forces of Ukraine

Types of microenvironments	The structure of the microenvironment		
	Spatial and subject component	Activity component	Subject and social component
didactic	Lecture halls, classrooms, computer labs, laboratories, classrooms for interactive classes, scientific library, educational equipment	Traditional and problem-based lectures, seminars, discussions, roundtables, business games, communication training, and training projects	Relationships in systems: 'teacher-group of cadets', 'teacher-cadet', 'cadet-cadet', 'group of cadets-cadet'
practice-oriented	Educational and scientific laboratories, training rooms, training boxes, virtual reality classes, training grounds	Training sessions at training grounds, work of problem groups, applied projects, military engineering and professional training	Relationships in systems: 'lecturer/trainer-group of cadets', 'lecturer-trainer-cadet', 'cadet-cadet'
digital	Computer labs, multimedia classrooms, automated learning systems, Moodle system, virtual reality classes, specialised software and hardware	Distance learning, online testing; independent work with electronic learning materials, creation of digital learning environments	Relationships in systems: 'digital teacher-group of cadets', 'digital trainer-digital cadet', 'digital teacher-digital trainer-digital cadet'
health-promoting	Physical training grounds, training and sports complex, obstacle courses, sports town, medical and sanitary unit	Special physical training, sports events, meeting combat training standards in training and combat activities, preventive medical examinations	Relationships in systems: 'trainer-cadet', 'trainer-group of cadets'
social	Moral support centres, patriotic education centres, cultural and leisure support	Volunteer social, cultural, leisure, informational and sporting events	Relationships in systems: 'tutor-group of cadets', 'commander-group of cadets', 'members of the public-volunteer cadets'
educational	Moral and psychological support centre, sports and legal associations	Various educational events, concerts, work of various associations and communities in various fields	Relationships in the systems: 'supervisor-group of cadets', 'teacher-cadet', 'cadet-cadet'

BIBLIOGRAPHY:

1. Гончаренко І. Б., Михайлова Ю. О. Досвід підготовки кадрів для сектору безпеки та оборони провідних країн світу та шляхи його впровадження в Україні. *Вісник Харківського національного університету внутрішніх справ*. 2016. Вип. 3. С. 214–222.
2. Король Я. І., Луцишин А. М., Король Л. Я. Методичні основи проведення командно-штабних навчань (тренувань) під час підготовки майбутніх офіцерів логістики. *Інноваційна педагогіка*. 2024. Вип. 67(1). С. 183–187.
3. Марченко О. Г. Освітнє середовище у вищих військових навчальних закладах авіаційного профілю: теорія і практика формування та вдосконалення: монографія. Харків : ХНПУ імені Г. С. Сковороди, 2018. 412 с.
4. Мішенюк Р. М. Педагогічні технології у загальновійськовій підготовці майбутніх офіцерів-прикордонників: реалії та перспективи. *Теорія і методика професійної освіти*. 2022. Вип. 45. С. 192–195.
5. Остапчук В. М. Вибір професії військовослужбовця сучасною молоддю: усвідомлене рішення чи випадковість? *Суспільство. Держава. Армія. Збірник наукових праць (Гуманітарні та соціально-економічні науки)*. 2022. Вип. 26. С. 4–7.
6. Панченко Л. Ф. Інформаційно-освітнє середовище сучасного університету: монографія. Луганськ : Вид-во ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2010. 280 с.
7. Плачинда Т. С. Особливості організації освітнього середовища ЗВО авіаційного профілю. *Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології*. 2019. Вип. 6 (90). С. 124.
8. Федоренко О. І., Марченко О. Г. Світова теорія та практика формування освітнього середовища в закладах вищої освіти зі специфічними умовами навчання. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-327-9-15>
9. Цапівська Л. С. Компетентнісна освітня парадигма як цільова, спрямованість освіти в Україні. *Освіта і наука*. 2020. Вип. 2 (29). С. 125–129.

10. Шумков І. Організаційно-педагогічні умови формування фахової компетентності майбутніх офіцерів військової розвідки в умовах інформаційно-освітнього середовища ВВНЗ. *Актуальні питання гуманітарних наук*. 2024. Вип. 71 (3). С. 315–319.

REFERENCES:

1. Honcharenko, I. B., & Mykhailova, Yu. O. (2016). Dosvid pidhotovky kadriv dlia sektoru bezpeky ta oborony providnykh krain svitu ta shliakhy yoho vprovadzhennia v Ukraini [Evidence of personnel training for the security and defense sector of the leading edges of the world and its development in Ukraine]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu vnutrishnikh sprav – Bulletin of Kharkiv National University of Internal Affairs*, 3, 214–222 [in Ukrainian].
2. Korol, Ya. I., Lutsyshyn, A. M., & Korol, L. Ya. (2024). Metodychni osnovy provedennia komandno-shtabnykh navchan (trenuvan) pid chas pidhotovky maibutnikh ofitseriv lohistyky [Methodical bases of command and staff exercises (trainings) in the training of future logistics officers]. *Innovatsiina pedahohika – Innovative pedagogy*, 67(1), 183–187 [in Ukrainian].
3. Marchenko, O. H. (2018). *Osvitnie seredovyshche u vyshchykh viiskovykh navchalnykh zakladakh aviatsiinoho profilu: teoriia i praktyka formuvannia ta vdoskonalennia* [Educational environment in higher military educational institutions of aviation profile: theory and practice of formation and improvement]. [Monohrafiia]. Kharkiv : KhNPU imeni H. S. Skovorody, 412 [in Ukrainian].
4. Misheniuk, R. M. (2022). Pedahohichni tekhnolohii u zahalnoviiskovii pidhotovtsi maibutnikh ofitseriv-trykordonnykh: realii ta perspektyvy [Pedagogical technologies in the general military training of future border guard officers: realities and prospects]. *Teoriia i metodyka profesiinoi osvity – Theory and Methodology of Professional Education*, 45, 192–195 [in Ukrainian].
5. Ostapchuk, V. M. (2022). Vybir profesii viiskovosluzhbovtisia suchasnoi moloddiu: usvidomlene rishennia chy vypadkovist [Choosing a military profession by modern youth: a conscious decision or an accident]? *Suspilstvo. Derzhava. Armiia. Zbirnyk naukovykh prats (Humanitarni ta sotsialno-ekonomichni nauky) – Society. State. Army. Collection of scientific works (Humanities and socio-economic sciences)*, 26, 4–7 [in Ukrainian].
6. Panchenko, L. F. (2010). *Informatsiino-osvitnie seredovyshche suchasnoho universytetu* [Information and educational environment of the modern university]. [Monohrafiia]. Luhansk : Vyd-vo DZ “LNU imeni Tarasa Shevchenka”, 280 [in Ukrainian].
7. Plachynda, T. S. (2019). Osoblyvosti orhanizatsii osvitnoho seredovyshcha ZVO aviatsiinoho profilu [Features of the organization of the educational environment of aviation universities]. *Pedahohichni nauky: teoriia, istoriia, innovatsiini tekhnolohii – Pedagogical Sciences: Theory, History, Innovative Technologies*, 6 (90), 124 [in Ukrainian].
8. Fedorenko, O. I., & Marchenko, O. H. (2023). Svitova teoriia ta praktyka formuvannia osvitnoho seredovyshcha v zakladakh vyshchoi osvity zi spetsyfnymy umovamy navchannia [World theory and practice of forming an educational environment in higher education institutions with specific learning conditions]. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-327-9-15> [in Ukrainian].
9. Tsapovska, L. S. (2020). Kompetentnisna osvitnia paradyhma yak tsilova. spriamovanist osvity v Ukraini [Competence-based educational paradigm as a target orientation of education in Ukraine]. *Osvita i nauka – Education and Science*, 2(29), 125–129 [in Ukrainian].
10. Shumkov, I. (2024). Orhanizatsiino-pedahohichni umovy formuvannia fakhovoi kompetentnosti maibutnikh ofitseriv viiskovoi rozvidky v umovakh informatsiino-osvitnoho seredovyshcha VVNZ [Organizational and Pedagogical Conditions for the Formation of Professional Competence of Future Military Intelligence Officers in the Information and Educational Environment of a Military Intelligence University]. *Aktualni pytannia humanitarnykh nauk – Topical Issues of Humanities*, 71 (3), 315–319 [in Ukrainian].

ЗМІСТ

ХІМІЯ

Наталія ДУШЕЧКІНА, Олена КОЧУБЕЙ

ЕКОЛОГІЧНО ОРІЄНТОВАНИЙ НЕОРГАНІЧНИЙ СИНТЕЗ НАНОМАТЕРІАЛІВ
НА ОСНОВІ TiO_2 ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД.....3

Віталій ЛИСТВАН

РЕАКЦІЯ ВІТТИГА ЯК ПЕРСПЕКТИВНИЙ МЕТОД ОДЕРЖАННЯ НОВИХ ХАЛКОНІВ..... 9

Галина РІЗАК

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ГРУПАМИ 2,4-ДИОКСО-
ТА 4-ІМІНО-2-ОКСО-3-ФЕНІЛ-5-R-6-R-ТІСНО[2,3-d]ПІРИМІДИНІВ ТА ЇХ БІОЛОГІЧНОЮ
АКТИВНІСТЮ.....17

Tetiana SAVCHUK, Svitlana KOROLCHUK, Larysa MARUSHKO

REQUIREMENTS FOR WATER INTENDED FOR THE TECHNOLOGICAL PRODUCTION
OF BEVERAGES AND CONCENTRATES..... 26

**Віталія СЕМЕНЮК, Орися БЕРЕЗНЮК, Олена КЛИМОВИЧ, Інна ІВАЩЕНКО,
Софія БОДАШКО, Тарас ОСТАП'ЮК, Людмила ПІСКАЧ**

ДІАГРАМИ СТАНУ СИСТЕМ $\text{C}_2^{\text{III}}\text{X}_3 - \text{D}^{\text{IV}}\text{X}_2$ ($\text{C}^{\text{III}} - \text{As, Sb, Bi}$; $\text{D}^{\text{IV}} - \text{Ge, Sn}$; $\text{X} - \text{S, Se}$).....34

**Олександр ПРИМАЧУК, Богдан ЛУКАШЕВИЧ, Роман ШАНДРУК, Валерій СЛИВКА,
Леся САЛІЄВА, Наталія СЛИВКА**

ОЦІНКА АНТИОКСИДАНТНОЇ АКТИВНОСТІ АЦЕТАТІВ З ІМІДАЗОТІАЗИНОВИМ
ФРАГМЕНТОМ.....45

**Наталія СТЕЦЕНКО, Наталія БУБЛІЄНКО, Оксана САЛАВОР, Оксана НИЧИК,
Ольга ТОГАЧИНСЬКА**

АДСОРБЦІЙНЕ ОЧИЩЕННЯ НАПІВПРОДУКТІВ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА
ПАЛИГОРСЬКІТОМ ТА ГЛАУКОНІТОМ.....51

Андрій СТЕЦЬКІВ, Ірина ІВАНЧУК, Володимир ПАВЛЮК

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У СИСТЕМІ Nd-Li-Ge ЗА ТЕМПЕРАТУРИ 400 °C.....57

Юлія ХАРЧЕНКО, Аріна ДАШУТІНА

ОРГАНІЧНІ КИСЛОТИ СИРОВИНИ RHUS TYRHINA L.....68

В'ячеслав ЧОБОТАР, Володимир КОПЛІВЕВИЧ

ХІМІКО-АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСОУТВОРЕННЯ
НАНОЧАСТИНОК Cu, Zn, Fe З КАРБАМІДОМ..... 75

ЕКОЛОГІЯ

Ірина НЕТРОБЧУК, Марія БОЯРИН, Богдан ЖДАНЮК

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ВОДНИЙ РЕЖИМ РІЧКИ СТИР У ВОЛИНСЬКІЙ ОБЛАСТІ.....84

Ірина ПАЦЕВА, Анастасія КАГУКІНА, Інна МОЖАРІВСЬКА

НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ВІДНОВЛЕННЯ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ.....95

**Інна РИБАЛКА, Ніка ІВАХ, Оксана МЕЛЬНІКОВА, Оксана ЛЕНЕВИЧ,
Юрій ВЕРГЕЛЕС**

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ БІОУПАКОВКИ, ПАПЕРОВИХ
І ЗВИЧАЙНИХ ПЛАСТИКОВИХ ПАКЕТІВ У ҐРУНТІ.....102

Світлана СОВГІРА, Олена КОЧУБЕЙ, Наталія ДУШЕЧКІНА

ГЛОБАЛЬНІ НАСЛІДКИ НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

У ПІСНОВОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ.....112

ОСВІТНІ, ПЕДАГОГІЧНІ НАУКИ. ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА

Михайло КОЗЯР

ОРГАНІЗАЦІЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ЛЬВІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО

УНІВЕРСИТЕТУ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ З УРАХУВАННЯМ ВИКЛИКІВ

ПОВНОМАСШТАБНОЇ ВІЙНИ.....118

Ольга ПОВОРОЗНЮК

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕДАГОГІЧНИХ УМОВ ФОРМУВАННЯ ГОТОВНОСТІ

МАЙБУТНІХ САПЕРІВ (РОЗМІНУВАННЯ) ДО ПРОФЕСІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В УМОВАХ

ІНФОРМАТИЗАЦІЇ.....124

Volodymyr RODIKOV

SPECIFICS OF THE EDUCATIONAL ENVIRONMENT FOR THE PROFESSIONAL TRAINING

OF SERGEANT AND ENLISTED PERSONNEL OF THE ENGINEERING TROOPS

OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE.....130

CONTENTS

CHEMISTRY

Nataliia DUSHECHKINA, Olena KOCHUBEI

ECOLOGICALLY ORIENTED INORGANIC SYNTHESIS OF TiO₂-BASED NANOMATERIALS FOR WASTEWATER TREATMENT.....3

Vitalii LYSTVAN

WITTIG REACTION AS A PROMISING METHOD OF THE CHALCONES OBTAINING.....9

Galina RIZAK

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE FUNCTIONAL GROUPS OF 2,4-DIOXO- AND 4-IMINO-2-OXO-3-PHENYL-5-R-6-R-THIENO[2,3-d]PYRIMIDINES AND THEIR BIOLOGICAL ACTIVITY.....17

Tetiana SAVCHUK, Svitlana KOROLCHUK, Larysa MARUSHKO

REQUIREMENTS FOR WATER INTENDED FOR THE TECHNOLOGICAL PRODUCTION OF BEVERAGES AND CONCENTRATES.....26

Vitaliia SEMENIUK, Orysia BEREZNIUK, Olena KLYMOVYCH, Inna IVASHCHENKO, Sofia BODASHKO, Taras OSTAPIUK, Lyudmyla PISKACH

PHASE DIAGRAMS OF THE C₂^{III}X₃ – D^{IV}X₂ SYSTEMS (C^{III} – As, Sb, Bi; D^{IV} – Ge, Sn; X – S, Se).....34

Oleksandr PRYMACHUK, Bohdan LUKASHEVYCH, Roman SHANDRUK, Valeriy SLYVKA, Lesya SALIYEVA, Nataliia SLYVKA

EVALUATION OF THE ANTIOXIDANT ACTIVITY OF ACETATES WITH AN IMIDAZOTHIAZINE FRAGMENT.....45

Natalia STETSENKO, Natalia BUBLIENKO, Oksana SALAVOR, Oksana NYCHIK, Olga TOGACHYNSKA

ADSORPTION PURIFICATION OF SUGAR PRODUCTION INTERMEDIATES WITH PALYGORSKITE AND GLAUCONITE.....51

Andrij STETSKIV, Iryna IVANCHUK, Volodymyr PAVLYUK

STUDIES OF PHASE TRANSFORMATIONS IN THE Nd-Li-Ge SYSTEM AT A TEMPERATURE OF 400 °C.....57

Yuliia KHARCHENKO, Arina DASHUTINA

ORGANIC ACIDS OF RHUS TYPHINA L. PLANT RAW MATERIAL.....68

Viacheslav CHOBOTAR, Volodymyr KOPILEVICH

CHEMICAL AND ANALYTICAL STUDY OF THE COMPLEX FORMATION OF Cu, Zn, AND Fe NANOPARTICLES WITH CARBAMIDE.....75

ECOLOGY

Iryna NETROBCHUK, Mariia BOIARYN, Bohdan ZHDANIUK

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE WATER REGIME OF THE RIVER STYR IN VOLYN REGION.....84

Iryna PATSEVA, Anastasiia KAHUKINA, Inna MOZHARIVSKA

SCIENTIFIC APPROACHES TO SOLVING PROBLEMS OF FOREST ECOSYSTEM RESTORATION.....95

Inna RYBALKA, Nika IVAKH, Oksana MELNIKOVA, Oksana LENEVYCH, Yuriy VERGELES EXPERIMENTAL STUDY OF DEGRADATION OF BIO-BASED PACKAGING, PAPER AND CONVENTIONAL PLASTIC BAGS IN SOIL.....	102
---	-----

Svitlana SOVHIRA, Olena KOCHUBEI, Nataliia DUSHECHKINA GLOBAL IMPACTS OF HEAVY METALS ACCUMULATION IN FRESHWATER ECOSYSTEMS.....	112
--	-----

VOCATIONAL EDUCATION

Mykhailo KOZYAR ORGANISATION OF RESEARCH ACTIVITIES AT THE LVIV STATE UNIVERSITY OF LIFE SAFETY IN THE CONTEXT OF THE CHALLENGES OF FULL-SCALE WAR.....	118
--	-----

Olha POVOROZNIUK THEORETICAL JUSTIFICATION OF PEDAGOGICAL CONDITIONS FOR FORMING THE PROFESSIONAL READINESS OF FUTURE SAPPERS (DEMINING) UNDER THE CONDITIONS OF INFORMATISATION.....	124
---	-----

Volodymyr RODIKOV SPECIFICS OF THE EDUCATIONAL ENVIRONMENT FOR THE PROFESSIONAL TRAINING OF SERGEANT AND ENLISTED PERSONNEL OF THE ENGINEERING TROOPS OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE.....	130
---	-----

ПРОБЛЕМИ ХІМІЇ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Випуск 2

Коректура • Ірина Миколаївна Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Тетяна Олексіївна Клименко

Підписано до друку: 27.06.2025.

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 16,28. Замов. № 0825/635. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1

Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.