

Волинський національний університет
імені Лесі Українки

ПРОБЛЕМИ ХІМІЇ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Випуск 1



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
30 квітня 2025 р., протокол № 5

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 546.548.232.6:546.[654+655+656+657+571+681]'23

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-1>**Назарій БЛАШКО***старший лаборант кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025***ORCID:** 0000-0001-6484-3283**Олег МАРЧУК***доктор 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:** 0000-0002-5618-7156

Бібліографічний опис статті: Блашко, Н., Марчук, О. (2025). Нецентросиметричні селеніди $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ (R – La, Ce, Pr та Nd). *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 3–9, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-1>

НЕЦЕНТРОСИМЕТРИЧНІ СЕЛЕНІДИ $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ (R – La, Ce, Pr та Nd)

Селеніди складу $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ (R = La, Ce, Pr та Nd) одержували методом спікання елементарних компонентів у вакуумованих кварцевих контейнерах за температури 1320 К. Гомогенізуючий відпал сплавів за температури 770 К проводили протягом 500 годин. Кристалічна структура селенідів $La_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ ($a = 10.5959(5)$ Å, $c = 6.3684(5)$ Å, $R_1 = 0.0912$, $R_p = 0.2155$), $Ce_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ ($a = 10.4484(10)$ Å, $c = 6.3489(8)$ Å, $R_1 = 0.0998$, $R_p = 0.2363$), $Pr_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ ($a = 10.4419(9)$ Å, $c = 6.3747(7)$ Å, $R_1 = 0.0855$, $R_p = 0.1740$) та $Nd_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ ($a = 10.3059(5)$ Å, $c = 6.3798(5)$ Å, $R_1 = 0.0996$, $R_p = 0.2174$) вивчена методом порошкової дифрактометрії. Їх структура належить до структурного типу $La_3CuSi_5S_7$ (ПГ Р6₃; СП hP24). У цих структурах атоми РЗМ розташовані в ПСТ 6с (x y z) і разом з атомами селену формують тригональні призми з одним додатковим атомом [$R_3Se_3Se_2Se_3$] ($KЧ = 7$). Атоми Ga займають ПСТ 2а (0 0 z) та центрують октаедри з атомів селену ($KЧ = 6$). Атоми статистичних сумішей $M(0.45 Ag + 0.52 Ga)$, що локалізовані в ПСТ 2b (1/3 2/3 z) мають тетраедричне оточення [MSe_3Se_3] з атомів селену ($KЧ = 4$). Селен в кристалічній ґратці має три атомні позиції: Se1 і Se2 (ПСТ 6с) та Se3 (ПСТ 2b). Тригональні призми з одним додатковим атомом утворюють «блоки» $3[R_7Se]$. У цих «блоках» тригональні призми між собою з'єднані ребрами. Октаедри, центровані Ga, між собою з'єднані гранями та в напрямку осі c утворюють нескінченні колони $[Ga_6Se]_n$. Тригональні призми з октаедрами утворюють спільні грані. Тетраедри $[M_4Se]$ є ізольовані один від одного. При переході La–Ce–Pr–Nd спостерігається зменшення параметрів елементарної комірки за рахунок розмірного фактору РЗМ. Одержані селеніди можуть бути використані як перспективні матеріали для нелінійної оптики за рахунок нецентросиметричної структури.

Ключові слова: рідкісноземельні метали, селеніди, кристалічна структура, рентгенівський метод порошку, EDAX-аналіз.

Nazarii BLASHKO*Senior Laboratory Assistant at the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025***ORCID:** 0000-0001-6484-3283**Oleg MARCHUK***Doctor of Chemistry, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025***ORCID:** 0000-0002-5618-7156

To cite this article: Blashko, N., Marchuk, O. (2024). Netsentrosymetrychni selenidyy $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ (R – La, Ce, Pr and Nd). [Non-centrosymmetric selenides $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ (R – La, Ce, Pr and Nd)]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 3–9, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-1>

NON-CENTROSYMMETRIC SELENIDES $R_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (R – La, Ce, Pr AND Nd)

Selenides of the composition $R_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (R = La, Ce, Pr and Nd) were obtained by sintering the elementary components in evacuated quartz containers at 1320 K, with homogenizing annealing of the alloys at 770 K for 500 hours. The crystal structure of the selenides $\text{La}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (a = 10.5959(5) Å, c = 6.3684(5) Å, R_1 = 0.0912, R_p = 0.2155), $\text{Ce}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (a = 10.4484(10) Å, c = 6.3489(8) Å, R_1 = 0.0998, R_p = 0.2363), $\text{Pr}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (a = 10.4419(9) Å, c = 6.3747(7) Å, R_1 = 0.0855, R_p = 0.1740) and $\text{Nd}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (a = 10.3059(5) Å, c = 6.3798(5) Å, R_1 = 0.0996, R_p = 0.2174) was studied by powder diffractometry. Their structure belongs to the structural type $\text{La}_3\text{CuSiS}_7$ (SG $P6_3$; SP $hP24$). The rare-earth atoms in this structure are located in the 6c site ($x y z$) and center trigonal prisms of selenium atoms with one additional atom $[\text{R } 3\text{Se}_1 3\text{Se}_2 1\text{Se}_3]$ ($\text{CN} = 7$). Ga atoms occupy the 2a site (0 0 z) and center octahedra of selenium atoms ($\text{CN} = 6$). The atoms of the statistical mixtures $\text{M}(0.450\text{Ag} + 0.520\text{Ga})$ are localized in the 2b site (1/3 2/3 z) and have tetrahedral environment of selenium atoms $[\text{Ga } \text{Se}_1 3\text{Se}_3]$ ($\text{CN} = 4$). Selenium in the crystal lattice has three atomic positions, Se_1 , Se_2 (6c site) and Se_3 (2b site). Trigonal prisms with one additional atom form blocks $3[\text{R } 7\text{Se}]$ where the trigonal prisms are interconnected by edges. The Ga-centered octahedra are interconnected by faces and form infinite columns $[\text{Ga } 6\text{Se}]_n$ in the direction of the c axis. Trigonal prisms form common faces with octahedra. The $[\text{M } 4\text{Se}]$ tetrahedra are isolated from each other; a decrease in the unit cell parameters is observed in the La–Ce–Pr–Nd series due to the size factor of the rare earth elements. Obtained selenides can be used as promising materials for nonlinear optics due to the non-centrosymmetric structure.

Key words: rare earth metals, selenides, crystal structure, X-ray powder method, EDAX-analysis.

Актуальність проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Складні халькогеніди $R_3A_{0.45}\text{Ga}_{1.52}X_7$ та $R_3M_{0.1}\text{Ga}_{1.6}X_7$ (R – РЗМ; A – Cu, Ag; M – Mn, Fe, Co, Ni; X – S, Se) систематично вивчаються на кафедрі неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки (Блашко, 2017; Blashko, 2022; 2024). Матеріали на основі халькогенідів такого типу можуть прогнозовано бути перспективними об'єктами завдяки широкому спектру властивостей (оптичних, термічних, електричних і магнітних). Матеріали на їх основі застосовуються в інфрачервоній та лазерній техніці, нелінійній оптиці, термоелектричних генераторах, запам'ятовуючих пристроях і т.д. [Gulay, 2011]. Нецентросиметрична $P6_3$ -структура синтезованих селенідів дозволяє прогнозувати їх як матеріали для нелінійної оптики (Liu, 2015; Iyer, 2016; Li, 2017; Yang, 2023; Zhang, 2024).

Мета дослідження. Метою дослідження є вивчення кристалічної структури селенідів $R_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (R = La, Ce, Pr та Nd), як перспективних матеріалів для нелінійної оптики.

Експериментальна частина. Синтез чотирьох сплавів, загальною масою один грам кожен, для дослідження кристалічної структури селенідів $R_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (R = La, Ce, Pr та Nd) проводили з простих речовин із вмістом основного компонента не менше 99.99 мас.% в електричній муфельній печі з програмним управлінням технологічними процесами МП-30. Синтез у вакуумованих (10^{-2} Па) кварцевих контейнерах здійснювали згідно технологічного режиму: нагрів до температури 700 °C зі швидкістю 40 °C/год; витримка за температури 700 °C (10 годин);

нагрів до температури 1100 °C зі швидкістю 12 °C/год; витримка за температури 1100 °C (2 години); охолодження до температури 500 °C зі швидкістю 6 °C/год; гомогенізуючий відпал за температури 500 °C (240 годин); гартування синтезованих зразків у воду за кімнатної температури без розгерметизації контейнерів.

Розрахунок основних параметрів структури синтезованих фаз проводили за дифрактограмами, що були одержані в межах $2\theta = 10\text{--}100^\circ$ на рентгенівській установці ДРОН 4-13 з параметрами зйомки: CuK_α -випромінювання, крок сканування – 0,02°, експозиція у кожній точці – 10 с. Розрахунок кристалічної структури проведено методом Рітвельда (пакет програм WinCSD) [Grin, 2014]. Візуалізацію кристалічної структури виконано за допомогою програми VESTA 3.5.7 [Momma, 2011].

Результати та їх обговорення. Селеніди стехіометричного складу $R_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (R = La, Ce, Pr та Nd) синтезували на основі тернарних сполук $R_3\text{Ga}_{1.65}\text{Se}_7$ (R = La, Ce, Pr та Nd) шляхом часткового заміщення атомів галію в ПСТ 2b атомами одновалентного аргентуму.

Таблиця 1

Кристалографічні характеристики тернарних селенідів

Сполука	ПГ	Періоди комірки, Å			Література
		a	b	c	
$\text{La}_3\text{Ga}_{1.65}\text{Se}_7$	$P6_3$	10.44	–	6.20	[Patrie, 1969]
$\text{Ce}_3\text{Ga}_{1.65}\text{Se}_7$	$P6_3$	10.41	–	6.18	
$\text{Pr}_3\text{Ga}_{1.65}\text{Se}_7$	$P6_3$	10.38	–	6.17	
$\text{Nd}_3\text{Ga}_{1.67}\text{Se}_7$	$P6_3$	10.30	–	6.25	[Efendiev, 1964]

Таблиця 2

Умови зйомки та результати уточнення
кристалічної структури селенідів
 $R_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ ($R = \text{La}, \text{Ce}$)

Параметри	$\text{La}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$	$\text{Ce}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$
Просторова група та її номер	$P6_3$ (173)	$P6_3$ (173)
a , (Å)	10.5959(5)	10.4484(10)
c , (Å)	6.3684(5)	6.3489(8)
Об'єм комірки (Å ³)	619.2(1)	604.8(2)
Число атомів в комірни	23.9	23.9
Розрахована густина (г/см ³)	6.028(1)	6.191(2)
Абсорбційний коефіцієнт (1/см)	1128.38	1187.36
2Θ та $\sin\Theta/\lambda$ (макс.)	99.85; 0.496	100.00; 0.497
R_I	0.0912	0.0998
R_p	0.2155	0.2363
Фактор шкали	0.4190(2)	0.4949(3)
Вість текстури та її параметр	[1 4 6] 1.66(6)	[1 3 1] 0.36(0)

Таблиця 3

Умови зйомки та результати уточнення
кристалічної структури селенідів
 $R_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ ($R = \text{Pr}, \text{Nd}$)

Параметри	$\text{Pr}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$	$\text{Nd}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$
Просторова група та її номер	$P6_3$ (173)	$P6_3$ (173)
a , (Å)	10.4419(9)	10.3059(5)
c , (Å)	6.3747(7)	6.3798(5)
Об'єм комірки (Å ³)	601.9(2)	586.8(1)
Число атомів в комірни	23.9	23.9
Розрахована густина (г/см ³)	6.234(2)	6.451(1)
Абсорбційний коефіцієнт (1/см)	1223.35	1302.34
2Θ та $\sin\Theta/\lambda$ (макс.)	99.90; 0.496	100.00; 0.497
R_I	0.0855	0.0996
R_p	0.1740	0.2174
Фактор шкали	0.4808(2)	0.703(8)
Вість текстури та її параметр	[1 3 4] 1.19(0)	[1 3 8] 0.95(0)

Кристаліграфічні характеристики вихідних селенідів представлено в таблиці 1.

Кристалічна структура селенідів вивчалася рентгенівським методом порошку. Аналіз індексів Міллера hkl рефлексів та їх інтенсивностей вказує на приналежність структур синтезованих халькогенідів до структурного типу $\text{La}_3\text{CuSiS}_7$ [Guittard,

1972]. У таблицях 2 і 3 наведено умови проведення експерименту та кристаліграфічні характеристики структури синтезованих селенідів.

Теоретичні, експериментальні та різницеві між ними дифрактограми селенідів $R_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ ($R = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}$ та Nd) представлено на рисунку 1.

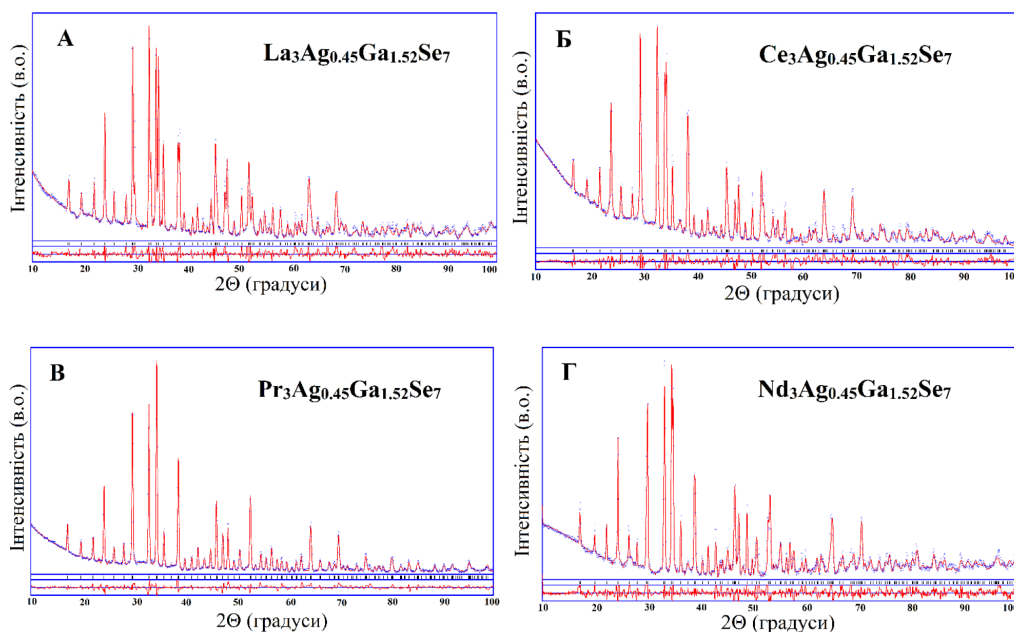


Рис. 1. Теоретичні (—), експериментальні (ooo) та різницеві між ними дифрактограми для $\text{La}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (А), $\text{Ce}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (Б), $\text{Pr}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (В) та $\text{Nd}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ (Г). [CuK_α-випромінювання ($\lambda = 1.54185$ Å)]

Таблиця 4

Координати та ізотропні параметри теплового коливання атомів у структурі селенідів
 $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$, (R – La, Ce, Pr та Nd)

$La_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$					
Атом	ПСТ	x	y	z	$B_{iso} \times 10^2 (\text{\AA}^2)$
La	6c	0.3742(3)	0.2303(3)	0.2359(10)	0.94(7)
M1	2b	1/3	2/3	0.162(2)	1.1(3)
Ga	2a	0	0	0.041(2)	1.8(4)
Se1	6c	0.1045(6)	0.2506(6)	0.2768(13)	1.7(2)
Se2	6c	0.5170(5)	0.0980(5)	0.5064(14)	1.0(2)
Se3	2b	1/3	2/3	0.525(3)	0.9(3)
$Ce_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$					
Атом	ПСТ	x	y	z	$B_{iso} \times 10^2 (\text{\AA}^2)$
Ce	6c	0.3767(4)	0.2320(6)	0.2228(13)	1.07(10)
M2	2b	1/3	2/3	0.165(2)	0.6(4)
Ga	2a	0	0	0.022(4)	3.2(6)
Se1	6c	0.1002(7)	0.2368(11)	0.282(2)	1.0(3)
Se2	6c	0.5150(6)	0.0917(11)	0.503(2)	0.5(2)
Se3	2b	1/3	2/3	0.532(4)	1.5(5)
$Pr_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$					
Атом	ПСТ	x	y	z	$B_{iso} \times 10^2 (\text{\AA}^2)$
Pr	6c	0.3776(4)	0.2272(2)	0.2297(9)	0.27(7)
M3	2b	1/3	2/3	0.169(2)	0.2(3)
Ga	2a	0	0	0.037(3)	2.1(4)
Se1	6c	0.1008(6)	0.2399(5)	0.2811(11)	0.1(2)
Se2	6c	0.5196(6)	0.0901(4)	0.5189(14)	0.2(2)
Se3	2b	1/3	2/3	0.545(3)	0.3(3)
$Nd_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$					
Атом	ПСТ	x	y	z	$B_{iso} \times 10^2 (\text{\AA}^2)$
Nd	6c	0.3787(5)	0.2281(4)	0.2308(12)	1.01(4)
M4	2b	1/3	2/3	0.155(2)	0.8(2)
Ga	2a	0	0	0.045(3)	1.9(3)
Se1	6c	0.1016(9)	0.2442(9)	0.2841(13)	0.93(12)
Se2	6c	0.5190(9)	0.0902(8)	0.4983(14)	1.07(12)
Se3	2b	1/3	2/3	0.511(3)	0.4(2)
$M1-M4 - 0.450 \text{ Ag} + 0.520 \text{ Ga}$					

Уточнення координат атомів у частках ребра елементарної комірки (x , y , z) та ізотропних теплових параметрів атомів (B_{iso}) у структурах синтезованих селенідів (таблиця 4) призвело до відносно задовільних значень R -факторів.

Елементарну комірку та укладку поліедрів $[R \ 7Se]$, $[Ga \ 6Se]$ і $[M \ 4Se]$ у структурі синтезованих селенідів зображено на рисунку 2.

У структурі селенідів атоми рідкісноземельних елементів локалізовані в правильній системі точок (ПСТ) 6c та координують навколо себе сім атомів селену ($KЧ = 7$), утворюючи тригональні призми $[R \ 7Se]$ з одним додатковим атомом. Ці призми утворюють «блоки» 3 $[R \ 7Se]$ в яких вони між собою з'єднані ребрами.

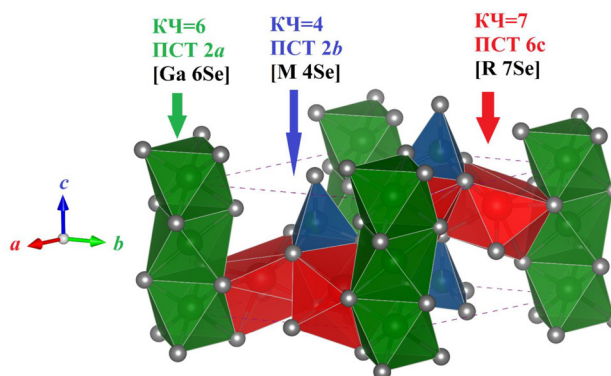


Рис. 2. Елементарна комірка та укладка поліедрів у структурах $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ (R = La, Ce, Pr та Nd)

Зі зменшенням величини симетричність призми зменшується про що свідчать значення індексів спотворення поліедрів та величини ефективного координаційного числа $[KЧ_{\text{ef}} = 6.85\text{--}6.61]$.

Для атомів галію, що займають ПСТ 2а, характерною є октаедрична координація ($KЧ = 6$). Октаедри $[Ga\ 6Se]$ є досить симетричні $[KЧ_{\text{ef}} = 5.92\text{--}5.98]$ за рахунок незначного вмісту аргентуму, мають спільні грані та в напрямку осі c утворюють нескінченні колони.

Атоми статистичної суміші M складу 46.4 % Ag та 53.6 % Ga центрують тетраедри з атомів селену. $[Ga\ 4Se]$ найбільш симетричні у структурі $Pr_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ ($c = 0.00853$), найменш симетричні у структурі $La_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ ($c = 0.03405$). Ці тетраедри є ізольовані один від одного.

Для серії селенідів $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ ($R = La, Ce, Pr$ та Nd) із зменшенням радіуса іона R^{3+} параметр елементарної комірки a зменшується від 10.5959(5) (для $La_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$) до

10.3059(5) Å (для $Nd_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$); об'єм елементарної комірки зменшується від 619.2(1) (для $La_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$) до 586.8(1) Å³ (для $Nd_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$). Така зміна параметрів елементарної комірки корелює із зменшенням об'ємів тригональних призми $[R\ 7Se]$ від 40.4399 Å³ (у структурі $La_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$) до 38.2565 Å³ (у структурі $Nd_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$). Розраховані величини середніх довжин зв'язків добре узгоджуються з сумами відповідних йонних радіусів [Wiberg, 2007].

Введення у структуру РЗМ-вмісних халькогенідів атомів хімічних елементів різної природи, сприяє геометричній кореляції параметрів поліедрів. Таким чином можна синтезувати матеріали з наперед заданою кристалічною структурою та фізичними властивостями.

Розраховані параметри поліедрів у структурах селенідів $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$, ($R = La, Ce, Pr, Nd$) представлено у таблицях 5 і 6.

Таблиця 5

Параметри поліедрів $[La(Ce)\ 7Se]$,
 $[Ga\ 6Se]$ та $[M\ 4Se]$ у структурі селенідів
 $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$, ($R = La, Ce$)

Параметри	$La_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$	$Ce_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$
	$[La(Ce)\ 7Se]$	
$\delta(La(Ce) - Se)$, Å	2.9825(2)– 3.18583(18)	2.93446(8)– 3.13951(0)
$\delta(La(Ce) - Se)_{\text{сеп}}$, Å	3.0808	3.0424
Індекс спотворення (χ)	0.02210	0.02234
V , Å ³	40.4399	38.9760
$KЧ / KЧ_{\text{ef}}$	7 / 6.85	7 / 6.83
	$[Ga\ 6Se]$	
$\delta(Ga - Se)$, Å	2.75494(15)– 2.85898(16)	2.64368(14)– 2.71720(16)
$\delta(Ga - Se)_{\text{сеп}}$, Å	2.8070	2.6804
Індекс спотворення (χ)	0.01853	0.01371
V , Å ³	29.4427	25.6386
$KЧ / KЧ_{\text{ef}}$	6 / 5.92	6 / 5.96
	$[M\ 4Se]$	
$\delta(M - Se_3)$, Å	2.3119(3)	2.331(13)
$\delta(M - Se_2)$, Å	2.40010(14)	2.445(6)
$\delta(M - Se)_{\text{сеп}}$, Å	2.3780	2.4167
$\angle Se_2 - Ga - Se_3$, (°)	114.413(3)	114.9(3)
$\angle Se_2 - Ga - Se_2$, (°)	104.109(3)	103.6(4)
Індекс спотворення (χ)	0.01392	0.01765
V , Å ³	6.8332	7.1597
$KЧ / KЧ_{\text{ef}}$	4 / 3.96	4 / 3.93

Таблиця 6

Параметри поліедрів $[Pr(Nd)\ 7Se]$,
 $[Ga\ 6Se]$ та $[M\ 4Se]$ у структурі селенідів
 $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$, ($R = Pr, Nd$)

Параметри	$Pr_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$	$Nd_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$
	$[Pr(Nd)\ 3Se_1 3Se_2 1Se_3]$	
$\delta(Pr(Nd) - Se)$, Å	2.89382(0)– 3.127(6)	2.909(4)– 3.148(4)
$\delta(Pr(Nd) - Se)_{\text{сеп}}$, Å	3.0500	3.0194
Індекс спотворення (χ)	0.02266	0.02277
V , Å ³	39.2437	38.2565
$KЧ / KЧ_{\text{ef}}$	7 / 6.77	7 / 6.61
	$[Ga\ 6Se]$	
$\delta(Ga - Se)$, Å	2.700(4)– 2.746(4)	2.6681(4)– 2.7523(4)
$\delta(Ga - Se)_{\text{сеп}}$, Å	2.7230	2.7102
Індекс спотворення (χ)	0.00853	0.01554
V , Å ³	26.9060	26.5089
$KЧ / KЧ_{\text{ef}}$	6 / 5.98	6 / 5.95
	$[M\ 4Se]$	
$\delta(M - Se_1)$, Å	2.398(13)	2.2720(4)
$\delta(M - Se_3)$, Å	2.413(8)	2.4039(4)
$\delta(Ga - Se)_{\text{сеп}}$, Å	2.4090	2.3709
$\angle Se_1 - Ga - Se_3$, (°)	113.4(4)	114.610(6)
$\angle Se_1 - Ga - Se_1$, (°)	105.3(5)	103.879(7)
Індекс спотворення (c)	0.00235	0.02087
V , Å ³	7.1250	6.7699
$KЧ / KЧ_{\text{ef}}$	4 / 3.99	4 / 3.86

Елементний склад селеніду $\text{Ce}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ було додатково оцінено за допомогою EDAX аналізу. Розраховані ат. % елементів Ce: 25.06, Ag: 3.76, Ga: 12.70, Se: 58.48; знайдені ат. % Ce: 24.92 ± 3.0 , Ag: 3.32 ± 0.43 , Ga: 10.08 ± 0.88 , Se: 58.69 ± 4.35 . Результати представлені на рисунку 3. Видно, що результати розрахунку структури та елементний аналіз добре узгоджуються між собою.

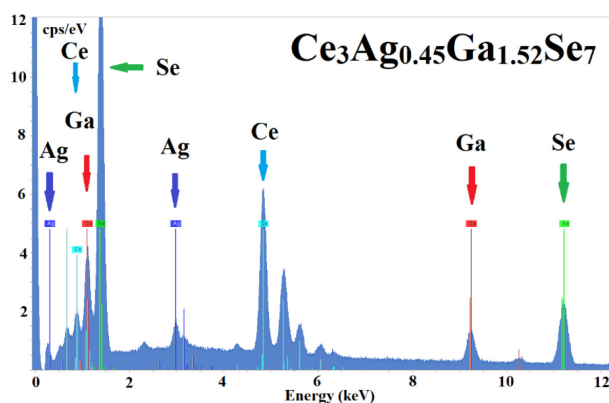


Рис. 3. EDAX спектр селеніду $\text{Ce}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$

Висновки і перспективи подальших досліджень. Вперше синтезовано, рентгенівським методом порошку вивчено та проаналізовано кристалічну структуру чотирьох тетрарних селенідів $R_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$ ($R = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}$ та Nd). На основі аналізу масиву експериментально отриманих результатів встановлено, що ці фази кристалізуються у гексагональній сингонії (СТ $\text{La}_3\text{CuSiS}_7$; ПГ $P6_3$; СП $hP24$) з параметрами елементарної комірки: $a = 10.5959(5) \text{ \AA}$, $c = 6.3648(5) \text{ \AA}$ та $V = 619.2(1) \text{ \AA}^3$ (для $\text{La}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$); $a = 10.4484(10) \text{ \AA}$, $c = 6.3489(8) \text{ \AA}$ та $V = 604.8(2) \text{ \AA}^3$ (для $\text{Ce}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$); $a = 10.4419(9) \text{ \AA}$, $c = 6.3747(7) \text{ \AA}$ та $V = 601.9(2) \text{ \AA}^3$ (для $\text{Pr}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$); $a = 10.305(2) \text{ \AA}$, $c = 6.380(1) \text{ \AA}$ та $V = 586.8(3) \text{ \AA}^3$ (для $\text{Nd}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{Se}_7$).

З огляду на те, що для синтезованих селенідів характерною є нецетросиметрична структура, вони можуть бути використані як матеріали для дослідження їх нелінійно-оптичних та інших характеристик.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Блашко Н., Марчук О., Федорчук А., Олексюк І. Кристалічна структура сполук $\text{Ce}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{S}_7$ та $\text{Pr}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{S}_7$. *Наук. Вісн. Ужгород. у-ту. Сер. хімія*. 2017. 1(37). С. 24–27.
2. Blashko N., Smitiukh O., Marchuk O. The crystal structure of $\text{La}_3\text{Pb}_{0.1}\text{Ga}_{1.6}\text{S}_7$ and $\text{Pr}_3\text{Pb}_{0.1}\text{Ga}_{1.6}\text{S}_7$ compounds. *Physics and chemistry of solid state*. 2022. 23(1). P. 96–100. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.1.96-100>
3. Blashko N., Marchuk O., Fedorchuk A. The crystal structure of $R_3\text{Fe}_{0.1}\text{Ga}_{1.6}\text{S}_7$ chalcogenides ($R = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}$ and Nd). *Physics and chemistry of solid state*. 2024. 25(4). P. 667–683. <https://doi.org/10.15330/pcss.25.4.677-683>
4. Gulay L., Daszkiewicz M. Ternary and Quaternary Chalcogenides of the Si, Ge, Sn, Pb and In. *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*. 2011. 250(41). P. 157–273. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53590-0.00003-0>
5. Liu Q., Zang X., Jin X., Lam K., Im J., Freeman A., Zunger A. Search and design of nonmagnetic centrosymmetric layered crystal with large local spin polarization. *Phys. Rev. B*. 2015. 91. 235204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.235204>
6. Iyer A., Yin W., Rudyk B., Lin X., Nilges T., Mar A. Metal ion displacements in noncentrosymmetric chalcogenides $\text{La}_3\text{Ga}_{1.67}\text{S}_7$, $\text{La}_3\text{Ag}_{0.6}\text{GaCh}_7$ ($\text{Ch} = \text{S}, \text{Se}$) and $\text{La}_3\text{MGaSe}_7$ ($M = \text{Zn}, \text{Cd}$). *J. Solid State Chem.* 2016. 243. P. 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.08.031>
7. Li Y., Liu P., Wu L. $\text{Ba}_6\text{Zn}_7\text{Ga}_2\text{S}_{16}$: A wide band gap sulfide with phase-matchable infrared NLO Properties. *Chem. Mat.* 2017. 29(12). P. 5259–5266. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b01321>
8. Yang P., Wu H., Hu Z., Wang J., Wu Y., Yu H. $\text{NaMn}_3\text{Ga}_3\text{S}_8$: Noncentrosymmetric inorganic metal chalcogenide with nonlinear optical response, antiferromagnetic, and photoluminescence performances. *Mat. Chem.* 2023. 33. 101727. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2023.101727>
9. Zang Y., Pei S., Chen W., Liu B., Jiang X., Guo G. The centrosymmetric to non-centrosymmetric transformation induced by alkaline-earth cations producing nonlinear optical $\text{AeMn}_6\text{Ga}_6\text{S}_{16}$ ($\text{Ae} = \text{Ca}, \text{Sr}$). *Sci. China Chem.* 2024. 67. P. 2941–2948. <https://doi.org/10.1007/s11426-024-2023-2>
10. Grin Y., Akselrud L. WinCSD: Software package for crystallographic calculations (Version 4). *J. Appl. Cryst.* 2014. 47(2). P. 803–805. <https://doi.org/10.1107/S1600576714001058>
11. Momma K., Izumi F. VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *J. Appl. Cryst.* 2011. 44(6). P. 1272–1276. <https://doi.org/10.1107/S0021889811038970>
12. Patrie M., Guittard M. Chimie minerale. Sur les composés du type $\text{Ce}_6\text{Al}_{10/3}\text{S}_{14}$. *C. R. Acad. Sci., Serie C*, 1969. 268. P. 1136–1138.
13. Efendiev G., Karaev Z., Nasibov I. About the interaction of selenides $\text{A}_2^{(\text{III})}\text{B}_3^{(\text{VI})}$ of neodymium and gallium. *Azerb. Khim. Zh.*, 1964. 4. P. 111–114

14. Guittard M., Julien-Pouzol M. Les composés hexagonaux de type $\text{La}_3\text{CuSiS}_7$. *Bull. Soc. Chim. Fr.* 1972. 3. P. 2207–2209.
15. Wiberg N, Wiberg E, Holleman A. *Lehrbuch der Anorganischen Chemie. Walter de Gruyter. 102. Auflage*, 2007. P. 2003–2004.

REFERENCES:

1. Blashko, N., Marchuk, O., Fedorchuk, A., & Olekseyuk, I. (2017). Krystalichna struktura spoluk $\text{Ce}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{S}_7$ та $\text{Pr}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{S}_7$. [Crystal structure of $\text{Ce}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{S}_7$ and $\text{Pr}_3\text{Ag}_{0.45}\text{Ga}_{1.52}\text{S}_7$ compounds]. *Visn. Uzhhor. nats. u-tu. Ser. Khimiya. – Uzhgorod Nat. Univ. Bull. Chemistry Series*, 1(37), 24–37 [in Ukrainian].
2. Blashko, N., Smitiukh, O., & Marchuk, O. (2022). The crystal structure of $\text{La}_3\text{Pb}_{0.1}\text{Ga}_{1.6}\text{S}_7$ and $\text{Pr}_3\text{Pb}_{0.1}\text{Ga}_{1.6}\text{S}_7$ compounds. *Physics and chemistry of solid state*, 23(1), 96–100. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.1.96-100>
3. Blashko, N., Marchuk, O., & Fedorchuk, A. (2024). The crystal structure of $\text{R}_3\text{Fe}_{0.1}\text{Ga}_{1.6}\text{S}_7$ chalcogenides ($\text{R} = \text{La}$, Ce , Pr and Nd). *Physics and chemistry of solid state*, 25(4), 667–683. <https://doi.org/10.15330/pcss.25.4.677-683>
4. Gulay, L., & Daszkiewicz M. (2011). Ternary and Quaternary Chalcogenides of the Si, Ge, Sn, Pb and In. *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, 250(41), 157–273. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53590-0.00003-0>
5. Liu, Q., Zang, X., Jin, X., Lam, K., Im, J., Freeman, A., & Zunger, A. (2015). Search and design of nonmagnetic centrosymmetric layered crystal with large local spin polarization. *Phys. Rev. B.*, 91, 235204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.235204>
6. Iyer, A., Yin, W., Rudyk, B., Lin, X., Nilges, T., & Mar, A. (2016). Metal ion displacements in noncentrosymmetric chalcogenides $\text{La}_3\text{Ga}_{1.67}\text{S}_7$, $\text{La}_3\text{Ag}_{0.6}\text{GaCh}_7$ ($\text{Ch} = \text{S}, \text{Se}$) and $\text{La}_3\text{MGaSe}_7$ ($\text{M} = \text{Zn}, \text{Cd}$). *J. Solid State Chem*, 243, 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.08.031>
7. Li, Y., Liu, P., & Wu, L. (2017). $\text{Ba}_6\text{Zn}_7\text{Ga}_2\text{S}_{16}$: A wide band gap sulfide with phase-matchable infrared NLO Properties. *Chem. Mat.*, 29(12), 5259–5266. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b01321>
8. Yang, P., Wu, H., Hu, Z., Wang, J., Wu, Y., & Yu, H. (2023). $\text{NaMn}_3\text{Ga}_3\text{S}_8$: Noncentrosymmetric inorganic metal chalcogenide with nonlinear optical response, antiferromagnetic, and photoluminescence performances. *Mat. Chem.*, 33, 101727. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2023.101727>
9. Zang, Y., Pei, S., Chen, W., Liu, B., Jiang, X., & Guo, G. (2024). The centrosymmetric to non-centrosymmetric transformation induced by alkaline-earth cations producing nonlinear optical $\text{AeMn}_6\text{Ga}_6\text{S}_{16}$ ($\text{Ae} = \text{Ca}, \text{Sr}$). *Sci. China Chem.*, 67, 2941–2948. <https://doi.org/10.1007/s11426-024-2023-2>
10. Grin, Y., & Akselrud, L. (2014). WinCSD: Software package for crystallographic calculations (Version 4). *J. Appl. Cryst.* 47(2), 803–805. <https://doi.org/10.1107/s1600576714001058>
11. Momma, K., & Izumi, F. (2011). VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *J. Appl. Cryst.*, 44(6), 1272–1276. <https://doi.org/10.1107/S0021889811038970>
12. Patrie, M., & Guittard, M. (1969). Chimie minerale. Sur les composés du type $\text{Ce}_6\text{Al}_{10/3}\text{S}_{14}$. *C. R. Acad. Sci., Serie C*, 268, 1136–1138.
13. Efendiev, G., Karaev, Z., & Nasibov, I. (1964). About the interaction of selenides $\text{A}_2^{(\text{III})}\text{B}_3^{(\text{VI})}$ of neodymium and gallium. *Azerb. Khim. Zh.*, 4, 111–114.
14. Guittard, M., Julien-Pouzol, M. (1972). Les composés hexagonaux de type $\text{La}_3\text{CuSiS}_7$. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 3, 2207–2209.
15. Wiberg, N., Wiberg, E., & Holleman, A. (2007). *Lehrbuch der Anorganischen Chemie. Walter de Gruyter. 102. Auflage*, 2003–2004.

УДК 547.781 + 547.869

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

Василь ЖИЛКО

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

Наталія СЛИВКА

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

ORCID: 0000-0002-3811-7138

Леся САЛІЄВА

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

ORCID: 0000-0002-1047-8652

Ольга ШКУРЕНКО

студентка факультету хімії та екології, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Елла КАДИКАЛО

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

ORCID: 0000-0002-5613-1662

Тетяна БОРТНІК

кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Поліська дослідна станція Національного наукового центру «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», вул. Шевченка, 35, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43000

Михайло ВОВК

доктор хімічних наук, професор, член-кореспондент Національної академії наук України, завідувач відділу хімії функціональних гетероциклічних систем, директор, Інститут органічної хімії Національної академії наук України, вул. Академіка Кухаря, 5, м. Київ, Україна, 02660

ORCID: 0000-0003-1753-3535

Бібліографічний опис статті: Жилко, В., Сливка, Н., Салієва, Л., Шкуренко, О., Кадикало, Е., Бортнік, Т., Вовк, М. (2025). Рістінгібуюча активність 2-(2-оксоіндолін-3-іліден)заміщених 5,6-дигідроімідазо[2,1-*b*]тіазолонів та 6,7-дигідротіазоло[3,2-*a*]піримідинонів. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 10–18, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-2>

**РІСТІНГІБУЮЧА АКТИВНІСТЬ 2-(2-ОКСОІНДОЛІН-3-ІЛІДЕН)ЗАМІЩЕНИХ
5,6-ДИГІДРОІМІДАЗО[2,1-*b*]ТІАЗОЛОНІВ
ТА 6,7-ДИГІДРОТІАЗОЛО[3,2-*a*]ПІРИМІДИНОНІВ**

Робота присвячена дослідженню рист регулюючої дії нових гідрованих сполук імідазотіазольного типу – 2-(2-оксоіндолін-3-іліден)-5,6-дигідроімідазо[2,1-*b*]тіазол-3(2H)-онів та тіазолопіримідинового типу – 2-(2-оксоіндолін-3-іліден)-6,7-дигідро-2H-тіазоло[3,2-*a*]піримідин-3(5H)-онів. Синтезовані сполуки з наперед заданою будовою було досліджено на виявлення особливостей фізіологічного розвитку проростків дводольної рослини *Cucumis sativus*. За результатами проведеного експерименту встановлено, що перебіг фізіологічних процесів у рослинному організмі носить різноплановий характер. Неоднозначність інгібуючого впливу залежить

від концентрації розчинів досліджуваних сполук та їх структури. Показано, що за використання 0,1 % розчину в жодному випадку не було зафіксовано переходу насінини огірка звичайного (*Cucumis sativus*) від спокою до початку активної життєдіяльності, а використання сполук у підвищених дозах супроводжувалося високою інгібуючою дією досліджуваних сполук, яка спричинила повну загибель рослинного організму, що підтверджується зникненням насінин. Натомість, при використанні розчинів тестованих сполук у концентраціях 0,01–0,0001 % має місце спадаючий пригнічуючий ефект. Найбільш сприятливими для росту і розвитку рослинного організму на ранніх етапах органогенезу виявились 0,0001 % концентрації робочих розчинів.

Зважаючи на отримані результати, подальше вивчення сполук **4a–в**, **5a–в** є доцільним у контексті їхнього потенційного застосування як гербіцидів для боротьби з дводольними бур'янами. В той час, для сполуки **4г** перспективним напрямом є детальніше дослідження її біологічної активності з акцентом на можливе використання як стимулятора росту рослин.

Ключові слова: 2-(2-оксоіндолін-3-іліден)-5,6-дигідроімідазо[2,1-*b*]тіазол-3(2H)-они, 2-(2-оксоіндолін-3-іліден)-6,7-дигідро-2H-тіазоло[3,2-*a*]піримідин-3(5H)-они, інгібуюча активність, пригнічуючий ефект, стимулятори росту.

Vasyl ZHYLKO

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

Nataliia SLYVKA

Doctor of Chemistry, Associate 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

Lesya SALIYEVA

Candidate of Chemical Sciences, Senior Lecturer at 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

Olga SHKURENKO

Student at the Faculty of Chemistry and Ecology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-7978-464X

Ella KADYKALO

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

ORCID: 0000-0002-5613-1662

Tatiana BORTNIK

Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Polissya Research Station National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky", 35 Shevchenko str., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43000

Mykhailo VOVK

Doctor of Chemistry, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of the Department of Chemistry of Functional Heterocyclic Systems, Director, Institute of Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5 Akademika Kukharia str., Kyiv, Ukraine, 02660

ORCID: 0000-0003-1753-3535

To cite this article: Zhylyko, V., Slyvka, N., Saliyeva, L., Shkurenko, O., Kadykalo E., Bortnik T., Vovk, M. (2025). Ristinhibiuiucha aktyvnist 2-(2-oksoindolin-3-iliden)zamishchenykh 5,6-dyhidroimidazo[2,1-*b*]tiazoloniv ta 6,7-dyhidrotiazolo[3,2-*a*]pirymidynoniv [Growth inhibiting activity of 2-(2-oxoindoline-3-

ylidene)substituted 5,6-dihydroimidazo[2,1-*b*]thiazolones and 6,7-dihydrothiazolo-[3,2-*a*]pyrimidinones]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 10–18, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-2>

GROWTH INHIBITING ACTIVITY OF 2-(2-OXOINDOLINE-3-YLIDENE) SUBSTITUTED 5,6-DIHYDROIMIDAZO[2,1-*b*]-THIAZOLONES AND 6,7-DIHYDROTHIAZOLO[3,2-*a*]PYRIMIDINONES

The work is devoted to the study of the growth-regulatory action of new hydrogenated compounds of the imidazothiazole type – 2-(2-oxoindoline-3-ylidene)-5,6-dihydroimidazo[2,1-*b*]thiazol-3(2H)-ones and of the thiazolopyrimidine type – 2-(2-oxoindoline-3-ylidene)-6,7-dihydro-2H-thiazolo[3,2-*a*]pyrimidin-3(5H)-ones. The synthesized compounds with a predetermined structure were investigated to identify the features of the physiological development of seedlings of the dicotyledonous plant *Cucumis sativus*. According to the experiment results, it was established that the course of physiological processes in the plant organism is diverse. The ambiguity of the inhibitory effect depends on the concentration of solutions of the studied compounds and their structure. It was shown that when using a 0.1 % solution, in no case was the transition of cucumber seeds (*Cucumis sativus*) from dormancy to the beginning of active life recorded, and the use of compounds in increased doses was accompanied by a high inhibitory effect of the studied compounds, which caused the complete death of the plant organism, as confirmed by the rotting of the seeds. On the other hand, when using solutions of the tested compounds in concentrations of 0.01–0.0001 %, a decreasing inhibitory effect occurs. The most favorable for the growth and development of the plant organism at the early stages of organogenesis were 0.0001 % concentration of working solutions.

Given the results obtained, further study of compounds **4a–c**, **5a–c** is appropriate in the context of their potential use as herbicides for controlling dicotyledonous weeds. Meanwhile, for compound **4g**, a more detailed study of its biological activity with an emphasis on its possible use as a plant growth promoter is a promising direction.

Key words: 2-(2-oxoindoline-3-ylidene)-5,6-dihydroimidazo[2,1-*b*]thiazol-3(2H)-ones, 2-(2-oxoindoline-3-ylidene)-6,7-dihydro-2H-thiazolo[3,2-*a*]pyrimidin-3(5H)-ones, inhibitory activity, suppressive effect, growth stimulants.

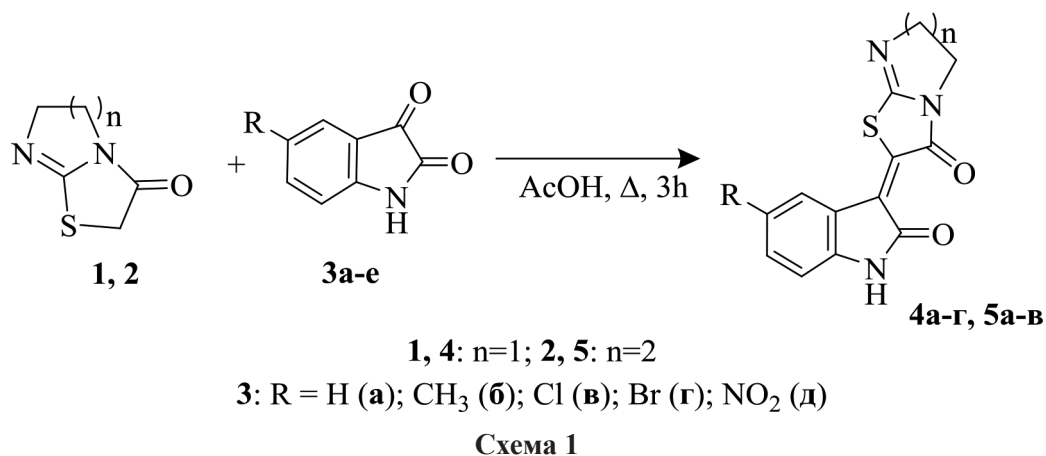
Останнім часом азотовмісні конденсовані гетероциклічні сполуки привертають особливу увагу дослідників у сферах органічної, фармацевтичної, медичної хімії та агрохімії. Це зумовлено їхньою широкою біологічною та фармакологічною активністю. На основі таких структур створено велику кількість лікарських засобів і біологічно активних сполук. Серед них особливе місце займають гідровані похідні імідазо[2,1-*b*]тіазолу, біциклічний скелет яких входить до складу інгібіторів лужної фосфатази [1], інгібіторів витоку йодидів у тироцитах [2], інгібіторів зворотного захоплення норадреналіну [3], протимікробних агентів [4] та потенційних зондів для візуалізації білка Гантінгтона (Huntingtin) [5]. Сучасні дослідження стосуються і гідрованого тіазолопіримідинового ядра, яке є ключовим фрагментом структури інгібіторів казеїнкінази 2 [6] та діацилгліцеролкінази [7], потенційних протидіабетичних [8], антимікробних [9] та анти-ВІЛ-1 [10] агентів, а також сполук із протипухлинною [11], проти-запальною [12], антиноцицептивною [13], кардіотонічною, інотропною, гіпотензивною [14] активностями.

Аналіз наукових джерел показав, що введення різноманітних заміщених ізатинових фрагментів у структуру гетероциклічних

субстратів є перспективним підходом до розробки сполук із високою гербіцидною активністю [15, 16]. Так, похідні ізатину виявляють помітну гербіцидну дію по відношенню до коренів ріпаку із ефектом інгібування 80–90 % при концентрації 10 мг/л [17]. Заміщені ізатини відзначаються високою активністю та широким спектром дії проти бур'янів родини капустяних *Arabidopsis thaliana* [18] та багаторічної рослини родини бобових *Trifolium pratense* [19].

З огляду на наведені вище факти видавалось доцільним дослідити фізіологічну дію синтезованих за схемою 1 2-(2-оксоіндолін-3-іліден) заміщених 5,6-дигідроімідазо[2,1-*b*]тіазолонів та 6,7-дигідротіазоло[3,2-*a*]піримідинонів **4a–г**, **5a–в** як рістрегулюючих агентів, що передбачало комплексне вивчення їх дії на всіх етапах розвитку рослинного організму *Cucumis sativus*, в тому числі, на ранніх етапах органогенезу.

На ранніх етапах розвитку одним із ключових показників якості насіння є його схожість, оскільки вона впливає на ріст, розвиток рослин, їхню врожайність і якість продукції. Дослідження [20] підтверджують, що підвищення схожості сприяє збільшенню врожаю сільськогосподарських культур завдяки покращенню фізіологічного та біологічного стану рослин.



Результати проведених експериментів показали, що вплив досліджуваних сполук на схожість насіння не є однозначним, за винятком випадків із високими концентраціями. Використання 0,1 % розчину не сприяло виходу насіння огірка звичайного (*Cucumis sativus*) зі стану спокою та початку активних фізіологічних процесів. Це свідчить про виражений інгібуючий ефект досліджуваних сполук у високих концентраціях, що зрештою призводить до загибелі насіння, що проявляється його гниттям.

За обробки насіння 0,01 % розчинами сполук виявлено не такий однозначний їх вплив на рослинний організм. Так, за використання сполук **4a**, **5a-в** також зафіксовано сильний пригнічуючий вплив на розвиток рослинного організму, де простежувалось їх загибель. Однак, у варіантах, де насіння обробляли **4б-г** такого негативного впливу не зафіксовано – у насінин перехід від стану спокою до активної життєдіяльності протікав практично на рівні

контрольного варіанта (обробка дистильованою водою), лише з тенденцією до пригнічення розвитку. Показник схожості у даних варіантах становив відповідно 91,33, 94,67 та 84,0 % і статистичної значущої різниці відповідно до контролю не було виявлено (див. таблицю 1).

Зменшення концентрації досліджуваних сполук до 0,001 % послабило їхню інгібуючу дію, зокрема для сполук **4a**, **5б**, **5в**. У цих варіантах спостерігалось проростання насіння, що свідчило про початок його розвитку. Однак під впливом зазначених сполук цей процес залишався пригніченим. Найбільш виражений інгібуючий ефект відзначався при застосуванні **4a**, **5б**, **5в**, оскільки схожість насіння була нижчою за контрольний показник на 31,33 %, 15,0 % та 8,66 % відповідно. Для сполуки **5a** спостерігалась лише незначна тенденція до пригнічення розвитку рослин, оскільки показник схожості становив 90,0 %. При цьому статистично значущих відмінностей у порівнянні з контрольним

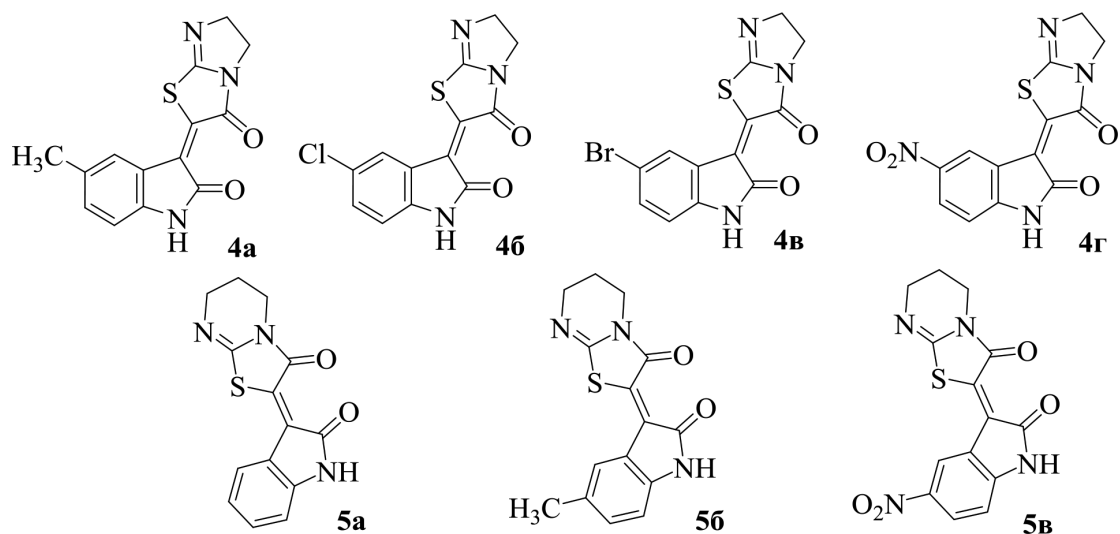


Рис 1. Сполуки, які досліджувалися на інгібуючу активність

варіантом виявлено не було. Аналогічна тенденція зафіксована за обробки насіння 0,001 % розчином 2-(5-бромо-2-оксоіндолін-3-іліден)-5,6-дигідроімідазо[2,1-*b*]тіазол-3(2*H*)-ону **4в**, де показник схожості становив 90,33 %. За використання 0,001 % розчину 2-(5-хлоро-2-оксоіндолін-3-іліден)-5,6-дигідроімідазо[2,1-*b*]тіазол-3(2*H*)-ону **4б** та 2-(5-нітро-2-оксоіндолін-3-іліден)-5,6-дигідроімідазо[2,1-*b*]тіазол-3(2*H*)-ону **4г** відмічено протилежну тенденцію, тобто дані сполуки проявляли легку стимулюючу дію, що забезпечило показник схожості на рівні 96,0 % та 96,33 % відповідно, тобто приріст відносно контролю становив 1,0–1,33 %.

Найбільш сприятливим щодо забезпечення протікання процесів росту і розвитку рослинного організму було використання досліджуваних сполук у десятитисячних долях. Проте слід зазначити, що при обробці насіння 0,0001 % розчинами сполук **5б** та **5в**, хоча інгібуючий ефект був менш вираженим, він усе ж спостерігався. Так, показник схожості насіння за використання **5б** становив 85,33 %, а **5в** – 80,67 %, тоді як на контролі – 95,33 %. У варіантах за використання 0,0001 % розчинів сполук **4а**, **4в**, **5а** відмічено лише незначну тенденцію до пригнічення проростання насіння – показник схожості відповідно становив 94,0, 92,0, 92 %. Такі значення свідчать, що статистично значущої різниці відносно контрольних варіантів не було зафіксовано. Щодо сполук **4б** та **4г**, то при обробці насіння їх 0,0001 % розчинами спостерігалася така ж закономірність, як і при вищій концентрації (0,001 %). Зокрема, відзначався незначний стимулюючий ефект, який забезпечив зростання досліджуваного параметра на 1,34 %.

Враховуючи вище наведені дані можна зробити висновок, що досліджувані сполуки характеризуються значним впливом на рослинний організм, який проявляється у призупиненні, приторможуванні або стимуляції протікання фізіологічних процесів. Враховуючи ці властивості сполук доцільним є проведення оцінки таких біологічних параметрів рослинного організму як маса проростка та його довжина, адже в окремих випадках не можливо відмітити чіткої різниці у показниках схожості між варіантами, так як простежується лише тенденція до певного напрямку дії.

Оцінка результатів досліджень впливу новосинтезованих сполук на параметри росту

і розвитку проростків *Cucumis sativus* проводилась лише у варіантах за використання робочих їх розчинів у концентраціях 0,01, 0,001 та 0,0001 %. За обробки 0,1 % розчинами усіх досліджуваних сполук та 0,01 % розчинами **4а**, **5а–в** насіння загинуло, тому визначення біопараметрів не проводилось.

У варіантах за використання 0,01 % розчинів **4б**, **4в** відмічено, що проростки характеризувались показником маси відповідно на рівні 0,05 г та 0,06 г, а довжини – 6,40 см та 7,32 см, тоді як у контрольному варіанті дані параметри становили 0,10 г та 8,66 см. Такі параметри вказують на незадовільний їх розвиток та прояв інгібуючого впливу. За обробки насіння 0,01 % розчином **4г** маса проростка становила 0,08 г, що вказувало лише на тенденцію до пригнічення розвитку, так як статистично значуща різниця була відсутня. Відносно довжини проростка, то зафіксовано приріст відносно контролю на 1,49 см або 17,2 %, що свідчить про стимулюючий ефект даної сполуки.

Використання 0,001 % розчинів сполук **4а**, **5б**, **5в** негативно впливало на масу та довжину проростка. У даних варіантах відмічено пригнічуючий вплив, який сприяв формуванню рослинного організму масою 0,04 г за використання **5б**, 0,03 г – **4а** та 0,08 г – **5в** та довжиною – 5,69 см, 5,45 см та 7,34 см відповідно. Дещо менш вираженим інгібуючим ефектом характеризувалась сполука **5а**, який чітко проявлявся лише відносно показника маси проростка (0,08 г), тоді як довжина його становила 8,56 см, тобто практично була на рівні контрольного варіанту. У варіантах, де використовували 0,001 % розчини **4б** та **4в** суттєвих змін відносно контролю не було зафіксовано, маса проростка була на рівні 0,09 г, а довжина – 6,40 см та 7,36 см відповідно. Загалом спостерігалася слабо виражена тенденція до пригнічення розвитку рослин. Проте варто зауважити, що статистично значущих відмінностей не було виявлено. Позитивні результати були відмічені за обробки насіння 0,001 % розчином 2-(5-нітро-2-оксоіндолін-3-іліден)-5,6-дигідроімідазо[2,1-*b*]тіазол-3(2*H*)-ону **4г**. У даному варіанті проросток характеризувався масою 0,09 г, що було практично на рівні контрольного варіанту та довжиною – 10,80 см, забезпечивши приріст відносно контролю на 2,14 см або 24,7 %.

Аналогічно як і відносно впливу вперше синтезованих сполук на показник схожості,

найбільш сприятливими для росту і розвитку рослинного організму на ранніх етапах органогенезу виявились 0,0001 % концентрації робочих розчинів.

Щодо сполук **4а**, **5б**, **5в**, то навіть у десяти-тисячних долях їх використання продовжував простежуватись інгібуючий ефект, хоч із меншою інтенсивністю. Так, за обробки насіння 0,0001 % розчином **5б** утворений проросток мав масу 0,03 г та довжину – 5,55 см, **4а** – 0,04 г та 5,7 см, **5в** – 0,08 г та 7,84 см, що відповідно було нижче контролю на 0,02–0,07 г, 1,19–3,11 см. Менш вираженим інгібуючим впливом на формування проростка характеризувалась сполука **5а**, використання якої у десятитисячній концентрації забезпечило масу його на рівні 0,08 г та довжину – 8,0 см. Такі дані свідчать, що чіткий пригнічуючий ефект був відмічений лише щодо показника маси проростка, а відносно довжини – простежувалась лише негативна тенденція. Обробка насіння 0,0001 % розчинами

4б та **4в** забезпечила формування проростків масою 0,09 г та довжиною 8,33 см та 8,94 см відповідно, тобто статистично значущої різниці відносно контролю не було зафіксовано. Це вказує на відсутність чіткого прояву інгібуючого чи стимулюючого ефектів. У варіантах за використання **4г** у концентрації 0,0001 % спостерігався позитивний вплив на біологічні параметри розвитку проростка. Зокрема, сформувався проросток масою 0,10 г і довжиною 10,48 см. За масою цей показник не відрізнявся від контрольного варіанту, а за довжиною відзначалося збільшення на 1,82 см, що становило 21,0 %.

Підсумовуючи результати досліджень, можна зробити висновок, що новосинтезовані сполуки виявляють інгібуючий вплив на ріст і розвиток рослинного організму *Cucumis sativus* на початкових стадіях органогенезу. Ступінь цього впливу залежить від концентрації робочого розчину та хімічної будови сполуки. Винятком є 2-(5-нітро-2-оксоіндолін-

Таблиця 1

Вплив синтезованих сполук на основні параметри *Cucumis sativus* на ранніх етапах органогенезу

Сполука	Показник	Варіант досліджу											НІР ₀₅
		Оброблення насіння					НІР ₀₅	Оброблення проростка					
		дист. вода	0,1 %	0,01 %	0,001 %	0,0001 %		дист. вода	0,1 %	0,01 %	0,001 %	0,0001 %	
4а	Схожість/Життєздатність, %	95,33	–	–	86,67	92	6,32	95,33	94	93,33	94	96	8,29
	Маса одного проростка, г	0,10	–	–	0,03	0,04	0,03	0,10	0,05	0,05	0,06	0,06	0,02
	Довжина одного проростка, см	8,66	–	–	5,45	5,70	1,33	8,66	6,18	7,29	7,06	6,81	1,32
4б	Схожість/Життєздатність, %	95,33	–	91,33	96	96,67	4,51	95,33	91,33	96	96	98	4,69
	Маса одного проростка, г	0,10	–	0,05	0,09	0,09	0,01	0,10	0,12	0,11	0,10	0,10	0,01
	Довжина одного проростка, см	8,66	–	6,40	8,26	8,33	3,12	8,66	8,88	8,79	8,50	8,81	1,30
4в	Схожість/Життєздатність, %	95,33	–	94,67	90,33	92	4,58	95,33	88,67	91,33	90,67	88	5,63
	Маса одного проростка, г	0,10	–	0,06	0,09	0,09	0,02	0,10	0,09	0,08	0,09	0,08	0,01
	Довжина одного проростка, см	8,66	–	7,36	9,02	8,94	1,35	8,66	10,62	9,09	9,40	9,40	1,70
4г	Схожість/Життєздатність, %	95,33	–	84	96,33	96,67	6,06	95,33	88	92,67	81,33	82	7,03
	Маса одного проростка, г	0,10	–	0,08	0,09	0,10	0,02	0,10	0,10	0,08	0,09	0,11	0,02
	Довжина одного проростка, см	8,66	–	10,15	10,80	10,48	0,56	8,66	10,93	9,56	10,20	10,42	1,64
5а	Схожість/Життєздатність, %	95,33	–	–	90	94	5,41	95,33	92	92,67	92,67	96,67	4,15
	Маса одного проростка, г	0,10	–	–	0,08	0,08	0,01	0,10	0,07	0,10	0,11	0,09	0,01
	Довжина одного проростка, см	8,66	–	–	8,56	8,00	0,73	8,66	7,85	8,86	9,62	8,96	1,56
5б	Схожість/Життєздатність, %	95,33	–	–	64	85,33	6,93	95,33	86	96,67	93,33	92,67	11,16
	Маса одного проростка, г	0,10	–	–	0,04	0,03	0,01	0,10	0,05	0,10	0,08	0,06	0,02
	Довжина одного проростка, см	8,66	–	–	5,69	5,55	0,37	8,66	5,61	8,53	7,29	6,62	0,97
5в	Схожість/Життєздатність, %	95,33	–	–	80,33	80,67	6,80	95,33	90,67	88	87,33	89,33	6,37
	Маса одного проростка, г	0,10	–	–	0,08	0,08	0,01	0,10	0,10	0,10	0,11	0,08	0,01
	Довжина одного проростка, см	8,66	–	–	7,34	7,47	0,93	8,66	8,69	10,87	11,00	10,05	1,72

3-іліден)-5,6-дигідроімідазо[2,1-*b*]тіазол-3(2*H*)-он, який у концентраціях 0,001 % та 0,0001 % продемонстрував слабкий стимулюючий ефект. Враховуючи отримані результати, доцільно продовжити вивчення сполук **4a–в**, **5a–в** для можливого використання їх як гербіцидів у боротьбі з дводольними бур'янами. Щодо сполуки **4г**, перспективним є детальніше вивчення її властивостей як фізіологічно активної речовини – стимулятора росту рослин.

Методика експерименту. Об'єктом дослідження була модельна дводольна рослина *Cucumis sativus*. Експериментальні процедури проводили з триразовою повторюваністю для забезпечення статистичної достовірності отриманих результатів.

Дослідження було спрямоване на визначення впливу синтезованих піридинілоксизаміщених (бензо)імідазо[2,1-*b*][1,3]тіазинових сполук на ранніх стадіях органогенезу рослинного організму. Для цього використовували дві експериментальні моделі:

Схема 1. Передбачала контрольний варіант (замочування насіння у дистильованій воді) та серію варіантів обробки насінневого матеріалу розчинами тестованої сполуки в концентраціях 0,1 %, 0,01 %, 0,001 % та 0,0001 %. Схожість насіння визначали згідно з нормативними вимогами ДСТУ 4138-2002, розраховуючи середнє значення між трьома аналітичними пробами (по 50 насінин у кожній). Оброблене протягом 24 год насіння піддавали процесу пророщування у стерильних умовах на фільтрувальному папері в чашках Петрі при контрольованій

температурі (25 °C). Моніторинг проростання здійснювали щоденно протягом 7 діб, після чого оцінювали лабораторну схожість, визначену як відсоткове співвідношення кількості пророслого насіння до загальної кількості висіяного матеріалу.

Схема 2. передбачала обробку на 7-му добу проростків, вирощених у дистильованій воді за стандартними умовами ДСТУ 4138-2002. Дослідні варіанти включали контроль (дистильована вода) та серію розчинів тестованої сполуки у концентраціях 0,1 %, 0,01 %, 0,001 % та 0,0001 %. Для кожного варіанту аналізу відбирали три проби по 50 морфологічно однорідних і непошкоджених проростків. Після експозиції у досліджуваних розчинах оцінювали їх життєздатність за критерієм активного росту, вираженим у відсотковому співвідношенні до загальної кількості проростків у вибірці.

На 7-й день (для першої моделі) та 14-й день (для другої моделі) виконували біометричний аналіз, включаючи визначення середньої сирової маси ваговим методом та вимірювання лінійних параметрів проростків (довжини). Для кожного експериментального варіанту здійснювали аналіз 30 проростків.

Запропоновані експериментальні моделі дозволяють оцінити вплив досліджуваних сполук на ключові фізіолого-біохімічні процеси, що супроводжують проростання насіння та ранні етапи морфогенезу проростків. Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали методом однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Chang L., Duy Do L., Mébarek S., Popowycz F., Pellet-Rostaing S., Lemaire M., Buchet R. Synthesis and evaluation of thiophenyl derivatives as inhibitors of alkaline phosphatase. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 2011. 21(8). 2297–2301.
2. Lecat-Guillet N., Ambroise Y. Synthesis and evaluation of imidazo[2,1-*b*]thiazoles as iodide efflux inhibitors in thyrocytes. *ChemMedChem.* 2009. 4(11). 1819–1830.
3. Brough P.A., Cheetham S.C., Kerrigan F., Watts J.P. Thiazoloderivatives and pharmaceutical compositions containing them. WO Patent 00/71549. 2000.
4. Li Y., Bionda N., Fleeman R., Wang H., Ozawa A., Houghten R.A., Shaw L. Identification of 5,6-dihydroimidazo[2,1-*b*]thiazoles as a new class of antimicrobial agents. *Bioorg. Med. Chem.* 2016. 24(21). 5633–5638.
5. Dominguez C., Wityak J., Bard J., Kiselyov A., Brown C.J., Galan S.R.G., Prime M.E., Giles P.R., Gadouleau E.L.P., Krülle T.M., Clark-Frew D., Johnson P.D., Schaertl S., Herrmann F., Grimm S.K., Kahmann J.D., Scheich C., Coe S., Hayes S. Probes for imaging Huntingtin protein. WO Patent 2016/033445. 2016.
6. Jin C.-H., Jun K.-Y., Lee E., Kim S., Kwon Y., Kim K., Na Y. Ethyl 2-(benzylidene)-7-methyl-3-oxo-2,3-dihydro-5*H*-thiazolo[3,2-*a*]pyrimidine-6-carboxylate analogues as a new scaffold for protein kinase casein kinase 2 inhibitor. *Bioorg. Med. Chem.* 2014. 22. 4553–4565.
7. Nobe K., Miyatake M., Nobe H., Sakai Y., Takashima J., Momose K. Novel diacylglycerol kinase inhibitor selectively suppressed an U46619-induced enhancement of mouse portal vein contraction under high glucose conditions. *Brit. J. Pharmacol.* 2004. 143. 166–178.

8. Batool I., Saeed A., Qureshi I. Z., Kalsoom S., Razzaq A. Synthesis, molecular docking and biological evaluation of new thiazolopyrimidine carboxylates as potential antidiabetic and antibacterial agents. *Res. Chem. Intermed.* 2016. 42. 1139–1163.
9. Bhalgat C.M., Ramesh B. Synthesis, antimicrobial screening and structure–activity relationship of novel pyrimidines and their thioethers. *Bull. Fac. Pharm. Cairo Univ.* 2014. 52. 259–267.
10. Danel K., Pedersen E. B., Nielsen C. Synthesis and Anti-HIV-1 Activity of Novel 2,3-Dihydro-7H-thiazolo[3,2-a]pyrimidin-7-ones. *J. Med. Chem.* 1998. 41. 191–198.
11. Hassan G.S. Synthesis and antitumor activity of certain new thiazolo[2,3-b]quinazoline and thiazolo[3,2-a]pyrimidine analogs. *Med. Chem. Res.* 2014. 23. 388–401.
12. Tozkoparan B., Ertan M., Kelicen P., Demirdamar R. Synthesis and anti-inflammatory activities of some thiazolo[3,2-a]pyrimidine derivatives. *Il Farmaco* 1999. 54. 588–593.
13. Selvam T. P., Karthik V., Kumar P. V., Ali M. A. Design, synthesis, antinociceptive, and anti-inflammatory properties of thiazolopyrimidine derivatives. *Toxicological & Environmental Chem.* 2012. 94. 1247–1258.
14. Jeanneau-Nicolle E., Benoit-Guyod M., Namil A., Leclerc G. New thiazolo[3,2-a]pyrimidine derivatives, synthesis and structure-activity relationships. *Eur. J. Med. Chem.* 1992. 27. 115–120.
15. Haga T., Nagano H., Enomoto M., Morita K., Sato M. Preparation of isatin derivatives as herbicides. Jpn. Patent 63313770. 1988.
16. Hambsch E. Isatins as selective herbicides. Ger. Patent DE1013469, 1957.
17. Wang J., Tan H., Li Y., Ma Y., Li Z., Guddat L. W. Chemical Synthesis, in Vitro Acetohydroxyacid Synthase (AHAS) Inhibition, Herbicidal Activity, and Computational Studies of Isatin Derivatives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011. 59(18). 9892–9900.
18. Tan H. Z., Wang W. M., Shang J. L., Song H. B., Li Z. M., Wang J. G. Syntheses, crystal structures and bioactivities of two isatin derivatives. *Chinese J. Struct. Chem.* 2011. 30(4) 502–507.
19. Schreiber K., Stephan U., Wegner G. Agent for controlling the growth of clover, especially red clover. Ger. Patent DD121011. 1976.
20. Іжик Н.К. Полевая всхожесть семян. Київ : Урожай. 1976. 190 с.

REFERENCES:

1. Chang, L., Do, D. L., Mébarek, S., Popowycz, F., Pellet-Rostaing, S., Lemaire, M., & Buchet, R. (2011). Synthesis and evaluation of thiophenyl derivatives as inhibitors of alkaline phosphatase. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 21(8), 2297–2301.
2. Lecat-Guillet, N., & Ambroise, Y. (2009). Synthesis and evaluation of imidazo[2,1-b]thiazoles as iodide efflux inhibitors in thyrocytes. *ChemMedChem*, 4(11), 1819–1830.
3. Brough, P.A., Cheetham, S.C., Kerrigan, F., & Watts, J.P. (2000). Thiazoloderivatives and pharmaceutical compositions containing them. *WO Patent 00/71549*.
4. Li, Y., Bionda, N., Fleeman, R., Wang, H., Ozawa, A., Houghten, R.A., & Shaw, L. (2016). Identification of 5,6-dihydroimidazo[2,1-b]thiazoles as a new class of antimicrobial agents. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 24(21), 5633–5638.
5. Dominguez, C., Wityak, J., Bard, J., Kiselyov, A., Brown, C.J., Galan, S. R. G., ... & Hayes, S. (2016). Probes for imaging Huntingtin protein. *WO Patent 2016/033445*.
6. Jin, C.-H., Jun, K.-Y., Lee, E., Kim, S., Kwon, Y., Kim, K., & Na, Y. (2014). Ethyl 2-(benzylidene)-7-methyl-3-oxo-2,3-dihydro-5H-thiazolo[3,2-a]pyrimidine-6-carboxylate analogues as a new scaffold for protein kinase casein kinase 2 inhibitor. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 22, 4553–4565.
7. Nobe, K., Miyatake, M., Nobe, H., Sakai, Y., Takashima, J., & Momose, K. (2004). Novel diacylglycerol kinase inhibitor selectively suppressed an U46619-induced enhancement of mouse portal vein contraction under high glucose conditions. *British Journal of Pharmacology*, 143, 166–178.
8. Batool, I., Saeed, A., Qureshi, I. Z., Kalsoom, S., & Razzaq, A. (2016). Synthesis, molecular docking and biological evaluation of new thiazolopyrimidine carboxylates as potential antidiabetic and antibacterial agents. *Research on Chemical Intermediates*, 42, 1139–1163.
9. Bhalgat, C.M., & Ramesh, B. (2014). Synthesis, antimicrobial screening and structure–activity relationship of novel pyrimidines and their thioethers. *Bulletin of Faculty of Pharmacy, Cairo University*, 52, 259–267.
10. Danel, K., Pedersen, E. B., & Nielsen, C. (1998). Synthesis and Anti-HIV-1 Activity of Novel 2,3-Dihydro-7H-thiazolo[3,2-a]pyrimidin-7-ones. *Journal of Medicinal Chemistry*, 41, 191–198.
11. Hassan, G. S. (2014). Synthesis and antitumor activity of certain new thiazolo[2,3-b]quinazoline and thiazolo[3,2-a]pyrimidine analogs. *Medicinal Chemistry Research*, 23, 388–401.

12. Tozkoparan, B., Ertan, M., Kelicen, P., & Demirdamar, R. (1999). Synthesis and anti-inflammatory activities of some thiazolo[3,2-*a*]pyrimidine derivatives. *Il Farmaco*, 54, 588–593.
13. Selvam, T.P., Karthik, V., Kumar, P.V., & Ali, M.A. (2012). Design, synthesis, antinociceptive, and anti-inflammatory properties of thiazolopyrimidine derivatives. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 94, 1247–1258.
14. Jeanneau-Nicolle, E., Benoit-Guyod, M., Namil, A., & Leclerc, G. (1992). New thiazolo[3,2-*a*]pyrimidine derivatives, synthesis and structure-activity relationships. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 27, 115–120.
15. Haga, T., Nagano, H., Enomoto, M., Morita, K., & Sato, M. (1988). Preparation of isatin derivatives as herbicides. *JPN Patent 63313770*.
16. Hambsch, E. (1957). Isatins as selective herbicides. *German Patent DE1013469*.
17. Wang, J., Tan, H., Li, Y., Ma, Y., Li, Z., & Guddat, L. W. (2011). Chemical Synthesis, in Vitro Acetohydroxyacid Synthase (AHAS) Inhibition, Herbicidal Activity, and Computational Studies of Isatin Derivatives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(18), 9892–9900.
18. Tan, H. Z., Wang, W. M., Shang, J. L., Song, H. B., Li, Z. M., & Wang, J. G. (2011). Syntheses, crystal structures and bioactivities of two isatin derivatives. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, 30(4), 502–507.
19. Schreiber, K., Stephan, U., & Wegner, G. (1976). Agent for controlling the growth of clover, especially red clover. *German Patent DD121011*.
20. Izhyk, N.K. (1976). *Polevaya vskhozhest semyan [Field germination of seeds]*. Kyiv : Urozhay. [in Ukrainian].

УДК 543.5

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-3>

Жолт КОРМОШ

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

ORCID: 0000-0001-6018-8787

Scopus Author ID: 35580134800

Наталія ГОРБАТЮК

кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та екології, завідувач

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300

ORCID: 0000-0001-5834-7830

Юлія БОХАН

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри природничих наук та методик їхнього навчання, Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка, вул. Шевченка, 1, м. Кропивницький, Кіровоградська обл., Україна, 25000

ORCID: 0000-0003-2974-0902

Наталія КОРМОШ

викладач-методист, спеціаліст вищої категорії, Луцький базовий медичний коледж, вул. Лесі Українки, 2, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43016

ORCID: 0000-0002-4272-888X

Наталія НЕДАЙБОРЩ

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

Людмила ЛЮЛЬЧЕНКО

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

Людмила ПІСКАЧ

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

ORCID: 0000-0003-3117-4006

Бібліографічний опис статті: Кормош, Ж., Горбатюк, Н., Бохан, Ю., Кормош, Н., Недайборщ, Н., Люльченко, Л., Піскач, Л. (2025). Іонний асоціат бендазолу з метиловим оранжевим та його аналітичне використання. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 19–24, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-3>

ІОННИЙ АСОЦІАТ БЕНДАЗОЛУ З МЕТИЛОВИМ ОРАНЖЕВИМ ТА ЙОГО АНАЛІТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ

Показано, що бендазол (БЕН) із метиловим оранжевим (МО) утворює іонний асоціат (ІА), із осадженням яких виділені чисті сполуки та створено пластифіковані мембранні потенціометричні бендазол-чутливі іон-селективні електроди.

Методом комп'ютерних розрахунків обґрунтовано можливість утворення ІА. Комп'ютерні розрахунки системою «МО + БЕН⁺» проводили з використанням пакета програм «HyperChem 8.0» для різноманітних вихідних ком-

бінацій розташування протиіонів (процедура «single point»). Геометричну оптимізацію іонів проводили методом молекулярної механіки ММ⁺. Стандартну енергію утворення іонів та асоціату «БЕН⁺ + МО⁻» визначали напів-емпіричним методом РМЗ. Різниця в теплоті утворення іонного асоціату і сумі енергій утворення катіона та аніона дорівнює 75,4 кДж/моль. Даний факт обґрунтовує вигідність утворення цільової сполуки.

На основі одержаних ІА синтезовано пластифіковані мембрани та сконструйовано бендазол-чутливі іон-селективні електроди. На хіміко-аналітичні характеристики таких електродів впливає ряд факторів, зокрема, властивості пластифікаторів, вміст іонного асоціату в мембрані та ін. Крайні результати отримано при застосуванні трикрезилфосфату та динонілфталату. При використанні інших пластифікаторів отримано не зовсім задовільні результати. Найбільш імовірно це пов'язано з їх діелектричною проникністю та інших параметрів. При рН 2–5 крайні електроди показали задовільне функціонування. Стабільність потенціалу становить 2–3 мВ/добу та установлюється за 8–13 с. Робочий термін розроблених електродів прослідковується не менше чотирьох місяців. Розроблені бендазол-чутливі електроди показують надійні результати в присутності низки речовин та іонів. проявляють задовільну селективність по відношенню до цілої низки речовин та іонів.

Для визначення бендазолу розроблена методика потенціометричного визначення, яка апробована при його визначенні у лікарських формах.

Ключові слова: бендазол, метиловий оранжевий, іонний асоціат, потенціометричний сенсор.

Zholt KORMOSH

Candidate of Chemical 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: 0000-0001-6018-8787

Scopus Author ID: 35580134800

Natalia HORBATYUK

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

ORCID: 0000-0001-5834-7830

Yuliya BOKHAN

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Natural Sciences and Methods of Their Education, Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, 1 Shevchenko str., Kropyvnytskyi, Kirovohrad region, Ukraine, 25000

ORCID: 0000-0003-2974-0902

Natalia KORMOSH

Teacher-Methodologist, Specialist at the Highest Category, Volyn Basic Medical College, 2 Lesya Ukrainka str., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43016

ORCID: 0000-0002-4272-888X

Natalia NEDAIBORSHCH

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

Lyudmila LYULCHENKO

Teacher-Intern at the Department of Chemistry and Ecology, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

Lyudmyla PISKACH

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

ORCID: 0000-0003-3117-4006

To cite this article: Kormosh, Zh., Horbatiuk, N., Bokhan, Yu., Kormosh, N., Nedaiborshch, N., Lyulchenko, L., Piskach, L. (2025). Ionnyi asotsiat bendazolu z metylovym oranzhevym ta yoho analitychne vykorystannia [Ionic associate of bendazol with methyl orange and its analytical application]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 4, 19–24, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-3>

IONIC ASSOCIATE OF BENDAZOL WITH METHYL ORANGE AND ITS ANALYTICAL APPLICATION

It was shown that bendazole (BEN) with methyl orange (MO) forms an ion associate (IA), with the precipitation of which pure compounds were isolated and plasticized membrane potentiometric bendazole-sensitive ion-selective electrodes were created.

The possibility of formation of IA is substantiated by the method of computer calculations. Computer calculations of the “MO⁻ + BEN⁺” systems were performed using the “HyperChem 8.0” program package for various initial combinations of counterion locations («single point» procedure). Geometrical optimization of ions was carried out using the MM⁺ molecular mechanics method. The standard energy of formation of ions and the associate “BEN⁺ + MO⁻” was determined by the semi-empirical PM3 method. The difference in the heat of formation of the ionic associate and the sum of the energies of formation of the cation and anion is 75.4 kJ/mol. This fact substantiates the profitability of the formation of the target compound.

On the basis of the obtained IA, plasticized membranes were synthesized and bendazole-sensitive ion-selective electrodes were constructed. The chemical and analytical characteristics of such electrodes are affected by a number of factors, in particular, the properties of plasticizers, the content of the ionic associate in the membrane, etc. The best results were obtained with the use of tricresyl phosphate and dinonyl phthalate. When using other plasticizers, not entirely satisfactory results were obtained. This is most likely related to their dielectric constant and other parameters. At pH 2–5, the best electrodes showed satisfactory functioning. The stability of the potential is 2–3 mV/day and is established in 8–13 seconds. The working life of the developed electrodes is monitored for at least four months. The developed bendazole-sensitive electrodes show reliable results in the presence of a number of substances and ions. show satisfactory selectivity in relation to a number of substances and ions.

For the determination of bendazole, a potentiometric determination technique was developed, which was tested in its determination in medicinal forms.

Key words: bendazol, methyl orange, ionic associate, potentiometric sensor.

Вступ. Бендазол (БЕН) (2-бензилбензимидазол, дибазол, дибазол, бендазол, тромаседан) – гіпотензивний препарат, який посилює активність NO-синтази в ниркових клубочках і збірних каналцях. Бендазол пригнічує прогресування міопії з депривацією форми (FDM) і пригнічує регуляцію HIF-1 α [1]. Дибазол (бендазол) впливає на процеси в клітинах крові – лейкоцитах і тромбоцитах. Його імуностимулююча активність полягає в підвищенні вмісту цГМФ в лімфоцитах, в результаті чого змінюється співвідношення цГМФ до цАМФ, збільшується вироблення факторів регуляції Т-лімфоцитами і В-лімфоцитами. У результаті дибазол стимулює вироблення поствакцинальних антитіл, зміцнює фагоцитоз, зміцнює бактерицидні властивості шкіри та крові, підвищує продукцію інтерферонів. Також препарат пригнічує окислювальні процеси в лейкоцитах і загальмовує гідролітичні процеси в тромбоцитах [1].

Інтенсивне застосування бендазолу обумовлює потребу в наявності надійних методів та методик його визначення у різноманітних об'єктах.

Аналіз літераури. Іон-селективні електроди (ІСЕ) добре зарекомендували себе і широко використовуються для визначення широко кола біологічно-активних речовин електрохімічним методом [2–11]. У літературі описано деякі ІСЕ, що дозволяють визначати бендазол [12]. Однак, при їх використанні далеко не завжди забезпечується необхідна достовірність та правильність результатів визначення бендазолу.

Метою даної роботи є створення нового бендазол-чутливого іон-селективного електрода на основі іонного асоціату (ІА) бендазолу з метиловим оранжевим (МО), оптимізувати електроаналітичні характеристики та провести його апробацію при визначенні БЕН у різних об'єктах.

Експериментальна частина. Стандартний розчин бендазолу готували розчиненням його точної наважки в розчині фоновому електроліту.

Цільову сполуку синтезували шляхом виділення у твердому вигляді при ретельному перемішуванні та відстоюванні розчину БЕН ($1 \cdot 10^{-5}$ моль/л) з МО у стехіометричному співвідношенні. Відстоювання маточного розчину

Таблиця 1

Енергетичні характеристики взаємодії
 $\text{MO}^- + \text{БЕН}^+$

Частина	Е, кДж/моль
БЕН^+	12 922,3
MO^-	15 798,7
$\Sigma(\text{MO}^- + \text{БЕН}^+)$	28 721,0
ІА ($\text{MO}^- \text{БЕН}^+$)	28 796,4
$\Sigma(\text{MO}^- + \text{БЕН}^+) - \text{ІА}$	75,4

проводили при кімнатній температурі протягом 24 год. Одержану сполуку, відфільтровували, очищали промиванням холодною водою і сушили при кімнатній температурі протягом 3 діб.

Пластифіковані полівінілхлоридні (ПВХ) мембрани готували наступним чином: до ПВХ та необхідну кількість електродоактивної речовини (ЕАР) (1–9 % від загальної маси мембрани) гомогенізували. Вводили потрібну кількість пластифікатора (естери фталевої кислоти), трикрезилфосфат (ТКФ), 0,5–1,0 мл розчинника (тетрагідрофурану) і змішували ретельно гомогенізували. Отриману консистенцію переносили у наперед підготовлену форму у формі кільця. Сушили до повітряно сухого стану. З отриманих мембран вирізали диски діаметром 0,7 см і приклеювали до торця полівінілхлоридної трубки.

Потенціометричні вимірювання проводили іономером І-160 при кімнатній температурі, як електрод порівняння використовували стандартний хлоридсрібний електрод ЕВЛ-1МЗ. При вимірах користувалися класичною схемою електрохімічного кола.

Іонну силу розчинів підтримували 0,1 моль/л розчином КСІ. Значення рН розчинів встановлювали за допомогою буферної суміші. Контроль рН здійснювали рН-метром рН-301.

Комп'ютерне моделювання систем « $\text{MO}^- + \text{БЕН}^+$ » та пов'язані з ним розрахунки проводили з використанням пакета «HyperChem 8.0» для різноманітних вихідних варіантів розташування протиіонів відносно один одного (процедура «single point»). Геометричну оптимізацію іонів проводили методом молекулярної механіки ММ⁺.

Результати та їх обговорення

Комп'ютерне моделювання. Методом комп'ютерного моделювання обґрунтовано можливість утворення цільового компонента, що в подальшому використовували як електроактивну речовину. Комп'ютерні розрахунки систем « $\text{MO}^- + \text{БЕН}^+$ » проводили з використанням пакета «HyperChem 8.0» для різноманітних вихідних варіантів розташування протиіонів відносно один одного (процедура «single point»). Геометричну оптимізацію іонів проводили методом молекулярної механіки ММ⁺.

Енергію утворення іонів та цільового компонента « $\text{БЕН}^+ + \text{MO}^-$ » визначали напівемпіричним методом РМЗ. Оптимізовані параметри. Як приклад, у таблиці 1 та рис. 1 наведені енергетичні характеристики взаємодії « $\text{MO}^- + \text{БЕН}^+$ ».

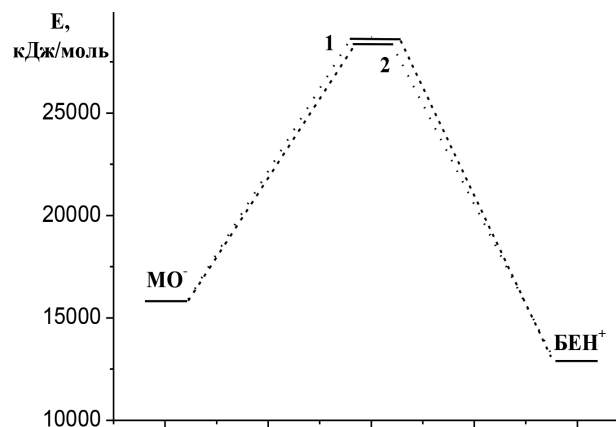


Рис. 1. Рівні енергії іонів MO^- , БЕН^+ та їх ІА; (1) сума енергій БЕН^- і БЕН^+ і (2) енергія ІА

Різниця в енергії утворення цільового компонента та сума енергій його компонентів дорівнює 75,4 кДж/моль. Таким чином, процес утворення ІА є енергетично вигідним.

Моделювання та оптимізація складу мембран. На основі одержаних ІА синтезовано пластифіковані мембрани та сконструйовано бендазол-чутливі іон-селективні електроди. Отримані ІСЕ із різним умістом ІА дають відклик в присутності $n \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-1}$ моль/л БЕН. При вмісті ІА від 1 до 5 % крутизна електродної функції дещо нижче теоретичної, нижня межа виявлення становить $n \cdot 10^{-5}$ моль/л БЕН. На хіміко-аналітичні характеристики таких електродів впливає ряд факторів, зокрема, властивості пластифікаторів, вміст іонного асоціату в мембрані та ін. Кращі результати отримано при застосуванні трикрезилфосфату та динонілфталату. При використанні інших пластифікаторів отримано не зовсім задовільні результати. Найбільш імовірно це пов'язано з їх діелектричною проникністю та інших параметрів. При рН 2–5 кращі електроди показали задовільне функціонування. Стабільність потенціалу становить

Таблиця 2

Результати визначення бендазолу у різних лікарських формах ($P = 0,95$; $n = 5$)

Назва, виробник, країна	Реглам. уміст, мг	Знайдено, мг					
		Пряма потенц.	RSD, %	Станд. добавок	RSD, %	Титр	RSD, %
Дибазол, Дарниця, Україна (таблетки)	20	20,20 ± 0,14	0,5	20,05 ± 0,20	0,7	19,98 ± 0,11	0,4
Дибазол, Дарниця, Україна (розчин для ін'єкцій)	50	50,00 ± 0,20	0,3	50,05 ± 0,20	0,3	50,00 ± 0,14	0,2

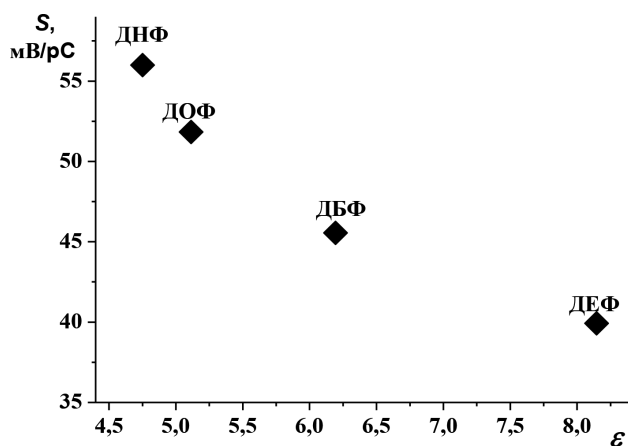


Рис. 2. Вплив діелектричної проникності фталатного пластифікатора на Нернстівську функцію БЕН-чутливого електрода

2–3 мВ/добу та установлюється за 8–13 с. Робочий термін розроблених електродів прослідковується не менше чотирьох місяців. Розроблені бендазол-чутливі електроди показують надійні результати в присутності низки речовин та іонів. проявляють задовільну селективність по відношенню до цілої низки речовин та іонів. Для мембран з однаковим вмістом пластифікатора одного гомологічного ряду (ДЕФ, ДБФ, ДОФ, ДНФ) нахил Нернстівської функції зменшується із зростанням діелектричної проникності розчинника-пластифікатора (рис. 2). Схожі результати отримані в роботі [7].

Визначення бендазолу. Для визначення бендазолу використовували методами прямої потенціометрії, стандартних добавок та режим потенціометричного титрування (як титрант використовували розчин тетрафенілборату

натрію). Лікарські форми подрібнювали, ретельно гомогенізували; наважку з отриманого порошку переносили у мірні колби на 50 мл шляхом розчинення у фоновому електроліті із рН 3. Результати досліджень наведені в табл. 2. Збіжність результатів, визначення свідчать про достовірність визначень та задовільні характеристики розроблених бендазол-чутливих іон-селективних електродів.

Висновки. Показано, що бендазол із метиловим оранжевим утворює іонний асоціат, який придатний для створення пластифікованих мембранних бендазол-чутливих іон-селективних електродів.

Методом комп'ютерного моделювання обґрунтовано енергоефективність формування цільового продукту.

Для створення мембран краще використовувати пластифікатори трикрезилфосфат та динонілфталат. Менш придатними виявились інші естери фталевої кислоти. Ймовірно це пов'язано з діелектричною розчинністю та іншими властивостями даних розчинників.

Розроблені іон-селективні електроди проявляють задовільну селективність по відношенню до цілої низки речовин та іонів.

Таким чином, показано, що іонні асоціати є перспективними електродоактивними речовинами для розробки іон-селективних електродів для визначення лікарських препаратів іоногенної природи. Дослідження нових іонних асоціатів дає змогу розробити нові експресні методики для визначення широкого кола різних біологічно-активних речовин.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Tong L., Cui D., Zeng J. Topical bendazol inhibits experimental myopia progression and decreases the ocular accumulation of HIF-1 α protein in young rabbits. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2020. T. 40. № 5. С. 567–576. doi: <https://doi.org/10.1111/opo.12717>
2. Kormosh Zh., Savchuk T. Potentiometric sensor for povidone-iodine determination. *Pharm. Chem. J.* 2016. Vol. 50. № 8. P. 556–557. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11094-016-1489-8>
3. Zuben N., Kormosh Z., Semenyshyn D., Kochubei V., Korolchuk S., Savchuk T. Design and application of levamisole-selective membrane sensor. *Anal. Bioanal. Electrochem.* 2016. Vol. 8. № 4. P. 466–477. URL: [http://abechem.ir/No.%204-2016/2016,%208\(4\),%20466-477.pdf](http://abechem.ir/No.%204-2016/2016,%208(4),%20466-477.pdf)

4. Zubenina N., Kormosh Z., Saribekova D., Sukharev S. Potentiometric membrane sensors for levamisole determination. *Mediterr. J. Chem.* 2016. Vol. 6. № 2. P. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.13171/mjc61/016111516/Kormosh>
5. Kormosh Zh.A., Savchuk T.I., Bazel Ya.R., Kormosh N., Zyma S. Potentiometric sensor for the determination of povidone-iodine. *Anal. Bioanal. Electrochem.* 2014. Vol. 6. № 3. P. 367–378. http://abechem.ir/No.%203-2014/2014_6_3_367-378.pdf
6. Antal I., Kormosh Zh., Bazel Y., Lysenko S., Kormosh N. Design of a Vitamin B₁-Selective Electrode Based on an Ion-Pair and Its Application to Pharmaceutical Analysis. *Electroanalysis*. 2010. Vol. 22. № 22. P. 2714–2719. <https://doi.org/10.1002/elan.201000124>
7. Zubenina N., Kormosh Zh., Semenyshyn D., Kochubei V., Kormosh A. Design of a Gramine-Selective Membrane Sensor. *Anal. Bioanal. Electrochem.* 2018. Vol. 10. № 5. P. 531–540. <https://www.sid.ir/paper/346445/en>
8. Kormosh Z.A., Markovska N.A., Kormosh N.N. Potentiometric Sensor for Benzylpenicillin Determination. *Pharm. Chem. J.* 2019. Vol. 53. P. 577–579. <https://doi.org/10.1007/s11094-019-02040-w>
9. Kormosh Zh., Kormosh N., Bokhan Yu., Gorbatiuk N., Kotsan I., Suprunovich S., Parchenko V., Savchuk T., Korolchuk S. Potentiometric Sensor for Naproxen Determination. *Pharm. Chem. J.* 2021. Vol. 55. № 1. P. 97–99. <https://doi.org/10.1007/s11094-021-02379-z>
10. Kormosh Zh., Kormosh N., Bokhan Y., Horbatiuk N., Yurchenko O., Tkach V., Onyschuk O. The New Mephenamate- and Phenylanthranilate- Selective Membrane Sensor. *Anal. Bioanal. Electrochem.* 2022. Vol. 14. № 1. P. 32–44. URL: http://www.abechem.com/article_249321.html
11. Kormosh Zh., Matskiv O., Kormosh N., Forostovska T., Bokhan Y., Golub V., Gorbatiuk N., Karaim O. *Pharm. Chem. J.* 2022. Vol. 55. № 12. P. 1412–1415. DOI <https://doi.org/10.1007/s11094-022-02590-6>
12. Shou-Zhuo Yao. Dibazol ion-selective electrodes. *J. Pharm. Biomed. Anal.* 1987. Vol. 5. № 4. pp. 325–331. [https://doi.org/10.1016/0731-7085\(87\)80038-9](https://doi.org/10.1016/0731-7085(87)80038-9)

REFERENCES:

1. Tong, L., Cui, D., & Zeng, J. (2020). Topical bendazol inhibits experimental myopia progression and decreases the ocular accumulation of HIF-1 α protein in young rabbits. *Ophthalmic Physiol Opt.* T. 40. № 5. C. 567–576. doi: <https://doi.org/10.1111/opo.12717>
2. Kormosh, Zh., & Savchuk, T. (2016). Potentiometric sensor for povidone-iodine determination. *Pharm. Chem. J.* Vol. 50. № 8. P. 556–557. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11094-016-1489-8>
3. Zubenina, N., Kormosh, Z., Semenyshyn, D., Kochubei, V., & Korolchuk, S., Savchuk, T. (2016). Design and application of levamisole-selective membrane sensor. *Anal. Bioanal. Electrochem.* Vol. 8. № 4. P. 466–477. Retrieved from [http://abechem.ir/No.%204-2016/2016,%208\(4\),%20466-477.pdf](http://abechem.ir/No.%204-2016/2016,%208(4),%20466-477.pdf)
4. Zubenina, N., Kormosh, Z., Saribekova, D., & Sukharev, S. (2016). Potentiometric membrane sensors for levamisole determination. *Mediterr. J. Chem.* Vol. 6. № 2. P. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.13171/mjc61/016111516/Kormosh>
5. Kormosh, Zh.A., Savchuk, T.I., Bazel, Ya.R., Kormosh, N., Zyma, S. (2014). Potentiometric sensor for the determination of povidone-iodine. *Anal. Bioanal. Electrochem.* Vol. 6. № 3. P. 367–378. Retrieved from http://abechem.ir/No.%203-2014/2014_6_3_367-378.pdf
6. Antal, I., Kormosh, Zh., Bazel, Y., Lysenko, S., & Kormosh, N. (2010). Design of a Vitamin B₁-Selective Electrode Based on an Ion-Pair and Its Application to Pharmaceutical Analysis. *Electroanalysis*. Vol. 22. № 22. P. 2714–2719. <https://doi.org/10.1002/elan.201000124>
7. Zubenina, N., Kormosh, Zh., Semenyshyn, D., Kochubei, V., Kormosh, A. (2018). Design of a Gramine-Selective Membrane Sensor. *Anal. Bioanal. Electrochem.* Vol. 10. № 5. P. 531–540. Retrieved from <https://www.sid.ir/paper/346445/en>
8. Kormosh, Z.A., Markovska, N.A., & Kormosh, N.N. (2019). Potentiometric Sensor for Benzylpenicillin Determination. *Pharm. Chem. J.* Vol. 53. P. 577–579. <https://doi.org/10.1007/s11094-019-02040-w>
9. Kormosh, Zh., Kormosh, N., Bokhan, Yu., Gorbatiuk, N., Kotsan, I., Suprunovich, S., Parchenko, V., Savchuk, T., & Korolchuk, S. (2021). Potentiometric Sensor for Naproxen Determination. *Pharm. Chem. J.* Vol. 55. № 1. P. 97–99. <https://doi.org/10.1007/s11094-021-02379-z>
10. Kormosh, Zh., Kormosh, N., Bokhan, Y., Horbatiuk, N., Yurchenko, O., Tkach, V., & Onyschuk, O. (2022). The New Mephenamate- and Phenylanthranilate- Selective Membrane Sensor. *Anal. Bioanal. Electrochem.* Vol. 14. № 1. P. 32–44. Retrieved from http://www.abechem.com/article_249321.html
11. Kormosh, Zh., Matskiv, O., Kormosh, N., Forostovska, T., Bokhan, Y., Golub, V., Gorbatiuk, N., & Karaim, O. (2022). Potentiometric sensor for ketoprofen determination. *Pharm. Chem. J.* Vol. 55. № 12. P. 1412–1415. DOI <https://doi.org/10.1007/s11094-022-02590-6>
12. Shou-Zhuo Yao. (1987). Dibazol ion-selective electrodes. *J. Pharm. Biomed. Anal.* Vol. 5. № 4. pp. 325–331. [https://doi.org/10.1016/0731-7085\(87\)80038-9](https://doi.org/10.1016/0731-7085(87)80038-9)

УДК 546.47+546.713+546.73

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-4>

Сергій НЕДІЛЬКО

доктор хімічних наук, професор, професор кафедри неорганічної хімії, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0000-0001-8946-7915

Scopus Author ID: 6604039050

Олексій ІВАНОВ

аспірант кафедри неорганічної хімії, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0009-0009-4476-409X

Бібліографічний опис статті: Неділько, С., Іванов, О. (2025). Програмований синтез манганітів структури шпінелі на прикладі $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 25–30, 231, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-4>

ПРОГРАМОВАНИЙ СИНТЕЗ МАНГАНІТІВ СТРУКТУРИ ШПІНЕЛІ НА ПРИКЛАДІ $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$

У даній роботі досліджено процеси формування фазового складу та структурних змін у шпінелях складу $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$, синтезованих методом горіння розчину (*solution combustion synthesis*). Основна увага приділялася вивченню впливу температури термічної обробки (400–1000 °C) на кристалічну структуру, фазовий склад, а також на особливості зв'язків у кристалічній решітці. Для комплексного аналізу застосовано порошкову рентгенівську дифракцію (ПРД), інфрачервону (ІЧ) спектроскопію, диференційно-термічний аналіз з термогравіметрією (ДТА/ТГ) та спектроскопію дифузного відбиття (СДВ).

Порошкова ентгенівська дифракція показала, що навіть без додаткового прожарювання формується основна шпінельна фаза $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$. Термообробка зразків призводила до покращення кристалічної впорядкованості, що проявлялося у звуженні дифракційних ліній і зростанні середнього розміру кристалітів від 6 до 75 нм зі збільшенням температури прожарювання. Оцінка параметрів комірки свідчила про поступове збільшення об'єму елементарної комірки та співвідношення *c/a*, що вказує на посилення тетрагональної деформації.

ІЧ-спектроскопія підтвердила відсутність органічних залишків у прекурсорі після горіння розчину та виявила смуги, характерні для вібраційних мод *M–O* (*M* = Zn, Co, Mn) у шпінельній структурі. Зі збільшенням температури прожарювання спостерігалось зміщення смуг поглинання у бік вищих частот, що пояснюється впорядкуванням катіонів і зменшенням дефектів у кристалічній решітці.

Результати ТГ/ДТА аналізу виявили нетипове збільшення маси (~23 %) у діапазоні температур до 800 °C, що пов'язується з окисненням Mn^{2+} до $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ та вбудовуванням кисню в структуру. Відсутність виражених екзо- чи ендотермічних піків свідчить про поступовий характер фазових змін без різких термічних ефектів.

Спектроскопія дифузного відбиття та аналіз Кубелка-Мунка дозволили визначити ширину забороненої зони (ШЗЗ) для зразків, прожарених при температурах 600–1000 °C.

Отримані результати демонструють значний вплив температури термічної обробки на структурно-фазові характеристики $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$, а також дозволяють глибше зрозуміти механізми формування шпінельної фази під час горіння розчину та наступної термообробки.

Ключові слова: цинкова шпінель, фазоутворення, розмір кристалітів, термічна обробка.

Serhii NEDILKO

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor at the Department of Inorganic Chemistry, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 60 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601

ORCID: 0000-0001-8946-7915

Scopus Author ID: 6604039050

Oleksii IVANOV

PhD Student at the Department of Inorganic Chemistry, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 60 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601

ORCID: 0009-0009-4476-409X

To cite this article: Nedilko, S., Ivanov, O. (2025). Proqramovanyi syntezy manhanitiv struktury shpineli na prykladi $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ [Programmed synthesis of spinel-structured manganites exemplified by $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 25–30, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-4>

PROGRAMMED SYNTHESIS OF SPINEL-STRUCTURED MANGANITES EXEMPLIFIED BY $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$

The study investigates the processes of phase composition formation and structural changes in spinels with the composition $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$, synthesized via solution combustion synthesis. The primary focus was on examining the influence of thermal treatment temperature (400–1000 °C) on the crystalline structure, phase composition, and bonding characteristics within the crystal lattice. A comprehensive analysis was conducted using powder X-ray diffraction (PXRD), infrared (IR) spectroscopy, differential thermal analysis with thermogravimetry (DTA/TG), and diffuse reflectance spectroscopy (DRS).

Powder X-ray diffraction revealed that the main spinel phase $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ formed even without additional calcination. Thermal treatment improved the crystalline ordering, evidenced by the narrowing of diffraction peaks and the increase in average crystallite size from 6 to 75 nm with rising calcination temperatures. Lattice parameter evaluations indicated a gradual increase in unit cell volume and c/a ratio, suggesting enhanced tetragonal distortion.

IR spectroscopy confirmed the absence of organic residues in the precursor after solution combustion and identified characteristic bands for M—O (M = Zn, Co, Mn) vibrational modes in the spinel structure. Increasing calcination temperatures caused the absorption bands to shift towards higher frequencies, attributed to cation ordering and reduced lattice defects.

TG/DTA analysis revealed an unusual mass gain (~23 %) up to 800 °C, associated with the oxidation of Mn^{2+} to $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ and oxygen incorporation into the structure. The absence of distinct exothermic or endothermic peaks indicated gradual phase changes without abrupt thermal events.

Diffuse reflectance spectroscopy combined with Kubelka-Munk analysis allowed the determination of the bandgap (Eg) for samples calcined between 600 and 1000 °C.

The obtained results highlight the significant impact of thermal treatment on the structural and phase characteristics of $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ and provide deeper insights into the mechanisms of spinel phase formation during solution combustion and subsequent thermal treatment.

Key words: zinc spinel, phase formation, crystallite size, thermal treatment.

Актуальність проблеми. Дослідження процесів фазоутворення в складних оксидних системах, зокрема в шпінелях складу AMn_2O_4 , є актуальним напрямом сучасного матеріалознавства (НАО et al., 2024). Особливий інтерес викликають заміщені шпінелі, де модифікація катіонного складу дозволяє цілеспрямовано змінювати фізико-хімічні властивості матеріалів. Однією з таких систем є $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$, де введення кобальту на місце цинку впливає на механізми фазоутворення, стабільність структури та властивості кінцевого матеріалу.

Фазоутворення є ключовим етапом у формуванні матеріалів із контрольованими властивостями. Від розуміння механізмів кристалізації, стабілізації певних фаз та умов їх формування залежить можливість синтезу матеріалів із заданими характеристиками для конкретних застосувань (Javed et al., 2024). У системах на основі ZnMn_2O_4 фазоутворення є складним процесом, що супроводжується можливими дефектоутвореннями, катіонною інверсією та появою побічних фаз, які можуть

значно впливати на функціональні властивості матеріалів.

Заміщення Zn^{2+} на Co^{2+} в кристалічній решітці може змінювати енергетичний ландшафт процесу фазоутворення, впливати на температури фазоутворення, тип утворених фаз і механізми їх формування. Це створює передумови для виникнення нових структурних особливостей, таких як катіонна інверсія чи нестехіометричні фази. Вивчення цих явищ дозволяє краще зрозуміти природу процесів, що відбуваються під час термічної обробки матеріалів, та управляти ними.

Метод горіння розчину, обраний для синтезу $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$, забезпечує швидке формування оксидної фази за рахунок екзотермічних реакцій, але також створює умови для формування неідеальних структур із підвищеним вмістом дефектів та пористістю. У таких умовах процес подальшої термічної обробки відіграє ключову роль у формуванні остаточного фазового складу та впорядкування кристалічної решітки.

Дослідження впливу температури прожарювання на процеси фазоутворення дозволяє з'ясувати, як змінюється кристалічна структура, які фази стабілізуються за певних умов, і яким чином відбувається перехід від аморфних структур до впорядкованої шпінельної фази. Це дає змогу оптимізувати умови синтезу для отримання матеріалів із необхідними властивостями.

Актуальність даного дослідження також зумовлена недостатньою кількістю робіт, присвячених детальному аналізу фазоутворення в заміщених шпінелях $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$, зокрема із застосуванням комплексних методів аналізу, таких як рентгенівська дифракція, інфрачервона спектроскопія та термогравіметрія. Отримані результати можуть бути використані для розробки нових матеріалів із контрольованими властивостями, зокрема для каталітичних застосувань, електронних пристроїв та енергетичних систем.

Таким чином, вивчення процесів фазоутворення в системі $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ є важливим як з фундаментальної точки зору, так і для практичних застосувань, оскільки дозволяє розкрити механізми кристалізації, стабілізації шпінельної фази та впливу катіонного заміщення на структурно-фазові характеристики матеріалу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні наукові дослідження, присвячені модифікації оксидних шпінелей та вивченню їх фізико-хімічних властивостей, демонструють широкий спектр підходів і значний прогрес у цій галузі. Зокрема, вивчення впливу наночастинок ZnFe_2O_4 на стабільність анодів літєвих джерел електроенергії показало позитивний ефект під час циклу заряджання та розряджання. Такі наноматеріали сприяють поліпшенню електрохімічної стабільності анодів, що є важливим для підвищення ефективності літій-іонних акумуляторів (Li et al., 2024).

У сфері фотокаталізу також спостерігається значний прогрес. Останні дослідження продемонстрували, що створення композитів на основі ZnFe_2O_4 з додаванням різноманітних функціональних домішок дозволяє значно покращити їх фотокаталітичну активність (Zhang et al., 2024; Liu et al., 2024). Це відкриває нові перспективи для застосування таких матеріалів у процесах очищення води та повітря, а також у виробництві водню з води.

Значна увага приділяється також вивченню сенсорних властивостей оксидних шпінелей. Наприклад, домішка вісмуту в ZnFe_2O_4 позитивно впливає на електрохімічні характеристики матеріалу, підвищуючи його чутливість у сенсорних пристроях (Madagalam et al., 2024). Це відкриває нові можливості для використання модифікованих шпінелей у газових сенсорах і біосенсорах.

У галузі фотоелектрохімії досягнуто значних результатів щодо покращення ефективності $p-n$ гетероструктур $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ для процесів фотоелектрохімічного розкладу води з метою отримання водню (Turkestani, 2024). Такі досягнення є важливими для розвитку водневої енергетики, яка розглядається як перспективне джерело відновлюваної енергії.

Дослідження біосумісності та функціональних властивостей шпінелей, легованих лантаном та кобальтом, демонструють їхній потенціал для використання в біомедицині застосуваннях та енергетичних пристроях (Paweł et al., 2023). Зокрема, такі матеріали можуть бути корисними для створення біосумісних імплантів або високоефективних електродів для акумуляторів.

Таким чином, сучасні дослідження показують, що модифікація оксидних шпінелів шляхом введення різних домішок дозволяє цілеспрямовано змінювати їх фізико-хімічні властивості, що розширює можливості їх застосування в енергетиці, екології, біомедицині та сенсорних технологіях.

Мета. Мета полягає у комплексному аналізі процесів фазоутворення, визначенні оптимальних умов синтезу для формування стабільної шпінельної фази $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ та встановленні зв'язку між умовами термічної обробки, кристалічною структурою та фізико-хімічними властивостями отриманих матеріалів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для отримання зразків шпінелі складу $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ було використано метод горіння розчину, який дозволяє синтезувати нанодисперсні матеріали з високою однорідністю фазового складу за відносно низьких температур.

Для синтезу використовували високочисті нітрати цинку ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), кобальту ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) та марганцю ($\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) як джерела відповідних

катіонів. Нітрати були обрані через їхню хорошу розчинність у воді та високу реакційну здатність під час горіння. В якості органічного пального застосовували лимонну кислоту ($C_6H_8O_7$), яка виконувала роль комплексоутворювача та палива під час горіння.

Необхідні кількості нітратів цинку, кобальту та марганцю були точно зважені відповідно до стехіометричного складу $Zn_{0,95}Co_{0,05}Mn_2O_4$. Прекурсори розчиняли у мінімальній кількості дистильованої води для забезпечення повної гомогенізації суміші. До одержаного розчину додавали лимонну кислоту в співвідношенні, що забезпечувало повне комплексоутворення з катіонами металів. pH розчину регулювали додаванням невеликої кількості аміаку (NH_4OH) до нейтрального або слаболужного значення ($pH \approx 7-8$).

Отриманий гомогенний розчин нагрівали на гарячій плиті до випаровування надлишку води, формуючи в'язкий гель. Після досягнення необхідної в'язкості, реакційну суміш піддавали нагріванню до температури 250–300 °C, при якій відбувалася самопідтримуюча реакція горіння. Екзотермічна реакція супроводжувалася інтенсивним виділенням газів (CO_2 , N_2) та швидким формуванням пухкого порошкоподібного продукту з високою пористістю.

Отримані порошки піддавали додатковій термічній обробці в муфельній печі при різних температурах – 400 °C, 600 °C, 800 °C та 1000 °C протягом 5 годин в атмосфері повітря та досліджувались методами ПРД та ІЧ спектроскопії.

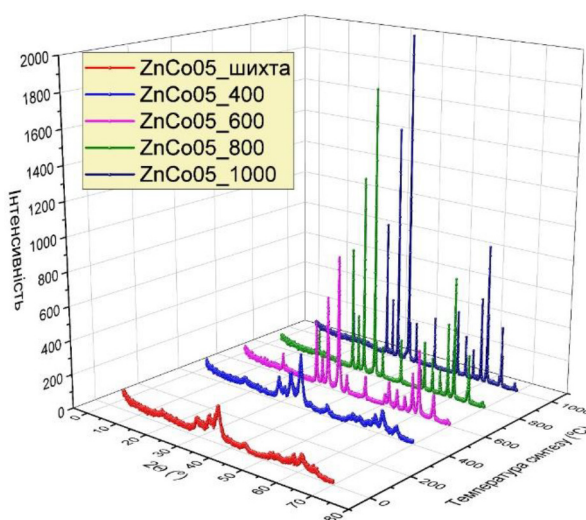


Рис. 1. Порошкова рентгенівська дифракція зразків, прожарених за різних температур

Результати та обговорення. Рентгенофазовий аналіз проведено на приладі SHIMADZU XRD 6000, 35кВ, 35 мА, крок 0.02°, час експозиції 1 сек/точку. Результати аналізу зразків приведено на рис. 1.

Можна спостерігати, що структура шпінелі без домішкових фаз формується вже на етапі горіння розчину та при подальшому прожарюванні збільшується висота рефлексів з одночасним зменшенням напівширини піків.

ІЧ спектроскопія шихти (рис. 2) показала, що наявна невелика домішка карбонатів металів (смуга на 1382 cm^{-1}), що може бути результатом сорбції CO_2 повітря при охолодженні шихти.

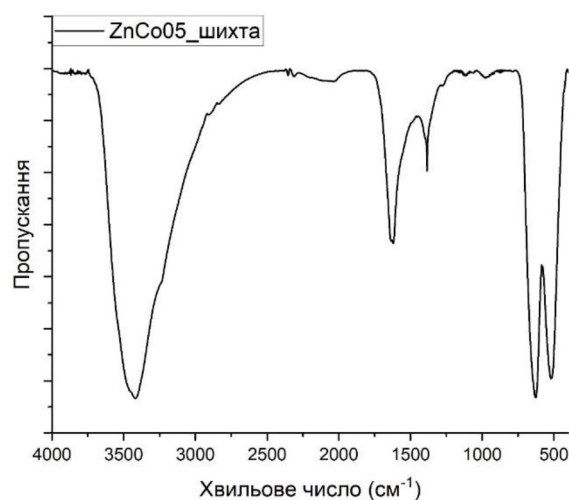


Рис. 2. ІЧ спектроскопія вихідної шихти

ДТА/ТГ показав (Рис. 3) аномальне збільшення маси (23 %) при нагріванні від 25 до 800 °C, що може свідчити про збільшення

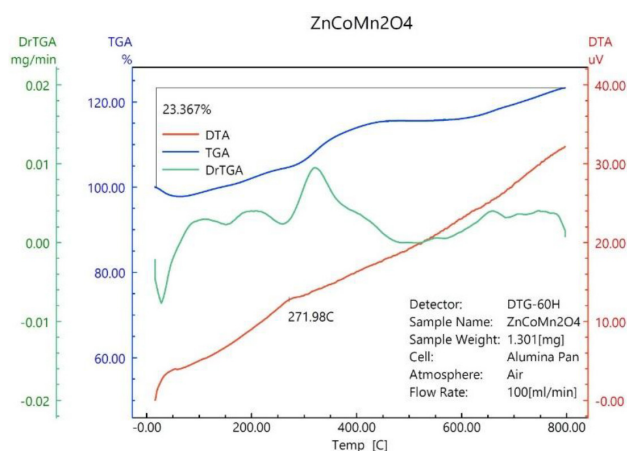
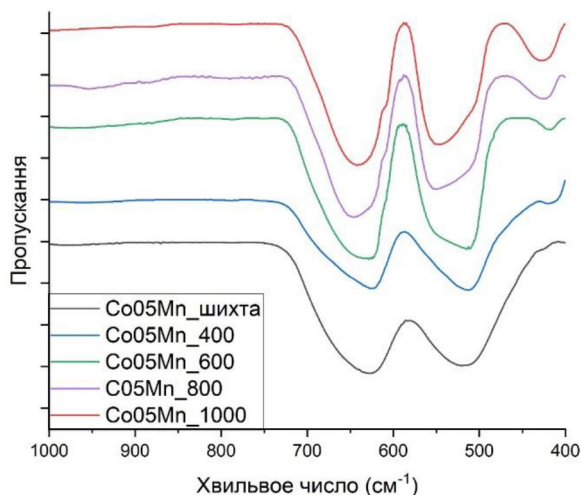


Рис. 3. Результати дослідження вихідної шихти за допомогою ДТА/ТГ. ІЧ спектроскопія

середнього ступеня окиснення мангану зі збереженням шпінельної структури.

Зразки було проаналізовано за допомогою спектрометра Perkin Elmer SPECTRUM BX у діапазоні $1000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ з роздільною здатністю 1 см^{-1} , використовуючи таблетки з KBr як матрицю.

Підвищення температури прожарювання призводить до зсуву максимумів поглинання на $5\text{--}20\text{ см}^{-1}$ у напрямку до вищих хвильових чисел (Рис. 4). Така зміна може бути зумовлена упорядкуванням катіонів у шпінельній структурі. Із зростанням температури відбувається частковий перерозподіл катіонів Zn^{2+} та $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{2+}$ між тетраедричними (А) та октаедричними (В) позиціями решітки. Цей процес змінює силові константи міжатомних зв'язків, що, у свою чергу, впливає на положення вібраційних мод у спектрі.

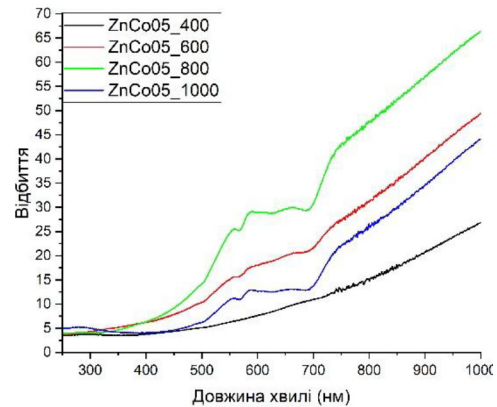


**Рис. 4. ІЧ спектри серії зразків.
Спектроскопія дифузного відбиття
(UV-VIS-NIR)**

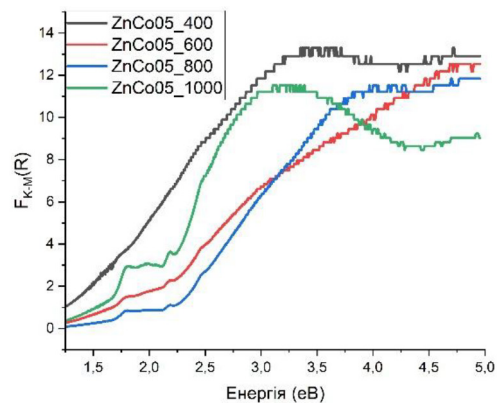
Зменшення кількості дефектів у кристалічній решітці: Термічна обробка сприяє зменшенню концентрації дефектів, що забезпечує більш однорідне локальне оточення атомів кисню

Спектроскопію дифузного відбиття для серії зразків було виконано з використанням спектрофотометра Shimadzu UV 2600i. Реєстрація спектрів проводилася в діапазоні довжин хвиль від 250 нм (ультрафіолетовий діапазон) до 1000 нм (ближній інфрачервоний діапазон) з кроком 1 нм.

Для обробки отриманих спектрів застосовували функцію Кубелки-Мунка. Ширину забороненої зони (ШЗЗ) для досліджуваних зразків визначали графічним методом Таука (рис. 5).



а



б

**Рис. 5. СДВ та графіки залежності функції
Кубелка-Мунка від енергії фотона**

ШЗЗ для зразків з температурою прожарювання $600\text{--}1000\text{ °C}$ становить 2.2 eV , що узгоджується з літературними даними. При 400 °C зразок не має ШЗЗ.

Висновки. У дослідженні синтезовано шпінель $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ методом горіння розчину та проаналізовано процеси фазоутворення при термічній обробці ($400\text{--}1000\text{ °C}$). Рентгенівська дифракція показала формування шпінельної фази вже на етапі горіння, а подальше прожарювання сприяло зменшенню напівширини рефлексів. ІЧ спектроскопія показала, що перерозподіл катіонів в підгатках при збільшенні температури прожарювання, але ШЗЗ при цьому майже не змінюється.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Hameed A., Asghar A., Shabbir S., Ahmed I., Tareen A. K., Khan K., Hussain G., Awaji M., Anwar H. A detailed investigation of rare earth lanthanum substitution effects on the structural, morphological, vibrational, optical, dielectric and magnetic properties of Co-Zn spinel ferrites. *Frontiers in Chemistry*. 2024. Vol. 12. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1433004>
2. Hao Y., Xiao Y., Liu X., Ma J., Lu Y., Chang Z., Luo D., Li L., Feng Q., Xu L., Huang Y. A novel $\text{SnO}_2/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ magnetic photocatalyst with excellent photocatalytic performance in Rhodamine B removal. *Catalysts*. 2024. Vol. 14. P. 350. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal14060350>
3. Javed K., Abbas N., Bilal M., Alshihri A., Nawaz H., Hassanien M., Naqvi S. Fabrication of a $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{Co}/\text{Ni}$ -MOF nanocomposite and photocatalytic degradation study of azo dyes. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. P. 30957–30970. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4RA05283H>
4. Li L., Li J., Hu C., Tan S., Shen A., Wang X. Nano- ZnFe_2O_4 facilitates lithium metal anode achieving high stability. *ChemistrySelect*. 2024. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.1002/slct.202403649>
5. Liu M., Quan Y., Feng M., Ren C., Wang Z. Ball-milling preparation of $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{AgI}$ nanocomposite with enhanced photocatalytic activity. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. P. 31193–31204. DOI: <https://doi.org/10.1039/d4ra05539j>
6. Madagalam M., Rosito M., Blangetti N., Etzi M., Padovano E., Bonelli B., Carrara S., Tagliaferro A., Bartoli M. Unveiling the effect of Bi in ZnFe_2O_4 nanoparticles in electrochemical sensors. *Applied Surface Science*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160870>
7. Paweł P., Szostak E., Pocheć E., Michalik J. M., Piętosza J., Tahraoui T., Łuszczek M., Gondek Ł. Biocompatibility and potential functionality of lanthanum-substituted cobalt ferrite spinels. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Vol. 966. P. 171433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171433>
8. Turkestani M. Enhancing the photoelectrochemical performance of a superlattice p–n heterojunction $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ electrode for hydrogen production. *Condensed Matter*. 2024. Vol. 9. P. 31. DOI: <https://doi.org/10.3390/condmat9030031>
9. Varma A., Mukasyan A. S., Rogachev A. S., Manukyan K. V. Solution combustion synthesis of nanoscale materials. *Chemical Reviews*. 2016. Vol. 116. Issue 23. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00279>
10. Zhang Z., Xie J., Zhang H., Xu Z., Lu H., Hu K. Magnetic 0D/1D $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnCO}_3$ rod-shaped nanocomposites and its in situ conversion to $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ with boosting and stable photo-Fenton activity for organic pollutants. *Journal of Electronic Materials*. 2024. Vol. 53. DOI: [10.1007/s11664-024-11111-y](https://doi.org/10.1007/s11664-024-11111-y)

REFERENCES:

1. Hameed, A., Asghar, A., Shabbir, S., Ahmed, I., Tareen, A. K., Khan, K., Hussain, G., Awaji, M., & Anwar, H. (2024). A detailed investigation of rare earth lanthanum substitution effects on the structural, morphological, vibrational, optical, dielectric and magnetic properties of Co-Zn spinel ferrites. *Frontiers in Chemistry*, 12. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1433004>
2. Hao, Y., Xiao, Y., Liu, X., Ma, J., Lu, Y., Chang, Z., Luo, D., Li, L., Feng, Q., Xu, L., & Huang, Y. (2024). A novel $\text{SnO}_2/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ magnetic photocatalyst with excellent photocatalytic performance in Rhodamine B removal. *Catalysts*, 14, 350. <https://doi.org/10.3390/catal14060350>
3. Javed, K., Abbas, N., Bilal, M., Alshihri, A., Nawaz, H., Hassanien, M., & Naqvi, S. (2024). Fabrication of a $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{Co}/\text{Ni}$ -MOF nanocomposite and photocatalytic degradation study of azo dyes. *RSC Advances*, 14, 30957–30970. <https://doi.org/10.1039/D4RA05283H>
4. Li, L., Li, J., Hu, C., Tan, S., Shen, A., & Wang, X. (2024). Nano- ZnFe_2O_4 facilitates lithium metal anode achieving high stability. *ChemistrySelect*, 9. <https://doi.org/10.1002/slct.202403649>
5. Liu, M., Quan, Y., Feng, M., Ren, C., & Wang, Z. (2024). Ball-milling preparation of $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{AgI}$ nanocomposite with enhanced photocatalytic activity. *RSC Advances*, 14, 31193–31204. <https://doi.org/10.1039/d4ra05539j>
6. Madagalam, M., Rosito, M., Blangetti, N., Etzi, M., Padovano, E., Bonelli, B., Carrara, S., Tagliaferro, A., & Bartoli, M. (2024). Unveiling the effect of Bi in ZnFe_2O_4 nanoparticles in electrochemical sensors. *Applied Surface Science*. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160870>
7. Paweł, P., Szostak, E., Pocheć, E., Michalik, J. M., Piętosza, J., Tahraoui, T., Łuszczek, M., & Gondek, Ł. (2023). Biocompatibility and potential functionality of lanthanum-substituted cobalt ferrite spinels. *Journal of Alloys and Compounds*, 966, 171433. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171433>
8. Turkestani, M. (2024). Enhancing the photoelectrochemical performance of a superlattice p–n heterojunction $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ electrode for hydrogen production. *Condensed Matter*, 9, 31. <https://doi.org/10.3390/condmat9030031>
9. Varma, A., Mukasyan, A. S., Rogachev, A. S., & Manukyan, K. V. (2016). Solution combustion synthesis of nanoscale materials. *Chemical Reviews*, 116(23). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00279>
10. Zhang, Z., Xie, J., Zhang, H., Xu, Z., Lu, H., & Hu, K. (2024). Magnetic 0D/1D $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnCO}_3$ rod-shaped nanocomposites and its in situ conversion to $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ with boosting and stable photo-Fenton activity for organic pollutants. *Journal of Electronic Materials*, 53. <https://doi.org/10.1007/s11664-024-11111-y>

УДК 547.732:547.736:615.011.5

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-5>**Галина РІЗАК***кандидат фармацевтичних наук, радник директора Фонду на громадських засадах, Благодійний Фонд підтримки освіти, науки, науково-технічної діяльності, м. Ужгород, Україна***ORCID:** 000-0002-0230-2366

Бібліографічний опис статті: Різак, Г. (2025). Інноваційні підходи до синтезу та вивчення біологічної дії нових гетероциклічних сполук на основі амініотіофенів. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 31–42, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-5>

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО СИНТЕЗУ ТА ВИВЧЕННЯ БІОЛОГІЧНОЇ ДІЇ НОВИХ ГЕТЕРОЦИКЛІЧНИХ СПОЛУК НА ОСНОВІ АМІНОТІОФЕНІВ

Розробка нових гетероциклічних сполук на основі амініотіофенів є одним з пріоритетних напрямків сучасної медичної та фармацевтичної хімії. Особлива увага до цього класу сполук обумовлена їх широким спектром біологічної активності та потенціалом у створенні нових лікарських засобів. Амініотіофени та їх похідні демонструють протимікробні, протизапальні, антиоксидантні та протипухлинні властивості, що робить їх перспективними об'єктами для подальших досліджень та розробки інноваційних терапевтичних агентів. Мета роботи полягає у систематизації та критичному аналізі сучасних методів синтезу гетероциклічних сполук на основі амініотіофенів, а також узагальненні даних щодо їх біологічної активності для визначення найперспективніших напрямків подальших досліджень у цій галузі. Методологія дослідження. В роботі використано комплексний підхід до аналізу наукової літератури з застосуванням систематичного огляду публікацій за останні 10 років у провідних міжнародних базах даних (Scopus, Web of Science, PubMed). Проведено порівняльний аналіз синтетичних методів, включаючи традиційні та інноваційні підходи (мікрохвильовий синтез, «зелена хімія», багатокомпонентні реакції). Систематизовано дані щодо біологічної активності отриманих сполук з використанням методів хемоінформатики та QSAR-аналізу. Наукова новизна. Вперше проведено комплексний аналіз взаємозв'язку між структурними модифікаціями амініотіофенів та їх біологічною активністю. Запропоновано нову класифікацію методів синтезу гетероциклічних похідних амініотіофенів з урахуванням принципів «зеленої хімії». Виявлено перспективні структурні фрагменти для дизайну нових біологічно активних сполук. Розроблено рекомендації щодо оптимізації синтетичних протоколів для підвищення виходу цільових продуктів. Висновки. На основі проведеного дослідження встановлено, що найбільш перспективними напрямками синтезу гетероциклічних сполук на основі амініотіофенів є застосування мікрохвильового випромінювання та багатокомпонентних реакцій, що дозволяє значно скоротити час реакції та підвищити вихід продуктів. Визначено ключові структурні фрагменти, що відповідають за прояв специфічної біологічної активності. Показано, що модифікація аміногрупи та введення додаткових гетероциклічних фрагментів суттєво впливає на спектр біологічної дії отриманих сполук. Результати дослідження створюють теоретичне підґрунтя для розробки нових лікарських засобів на основі похідних амініотіофенів та оптимізації методів їх синтезу.

Ключові слова: амініотіофени, гетероциклічні сполуки, органічний синтез, біологічна активність, інноваційні методи синтезу.

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). Innovatsiini pidkhody do syntezy ta vyvchennia biolohichnoi dii novykh heterotsyklichnykh spoluk na osnovi aminotiofeniv [Innovative approaches to the synthesis and study of biological action of new heterocyclic compounds based on aminothiophenes]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 31–42, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-5>

INNOVATIVE APPROACHES TO THE SYNTHESIS AND STUDY OF BIOLOGICAL ACTION OF NEW HETEROCYCLIC COMPOUNDS BASED ON AMINOTHIOPHENES

The development of new heterocyclic compounds based on aminothiophenes is one of the priority areas of modern medicinal and pharmaceutical chemistry. Particular attention is paid to this class of compounds due to their wide range of biological activity and potential for the development of new drugs. Aminothiophenes and their derivatives demonstrate antimicrobial, anti-inflammatory, antioxidant and antitumour properties, which makes them promising targets for further research and development of innovative therapeutic agents. The aim of this work is to systematise and critically analyse modern methods for the synthesis of heterocyclic compounds based on amino thiophenes, as well as to summarise data on their biological activity to identify the most promising areas for further research in this area. Research methodology. The study used a comprehensive approach to the analysis of scientific literature using a systematic review of publications over the past 10 years in leading international databases (Scopus, Web of Science, PubMed). A comparative analysis of synthetic methods, including traditional and innovative approaches (microwave synthesis, green chemistry, multicomponent reactions), was carried out. The data on the biological activity of the obtained compounds were systematised using chemoinformatics and QSAR analysis. Scientific novelty. For the first time, a comprehensive analysis of the relationship between structural modifications of amino thiophenes and their biological activity was carried out. A new classification of methods for the synthesis of heterocyclic aminothiophene derivatives was proposed, taking into account the principles of 'green chemistry'. Promising structural fragments for the design of new biologically active compounds were identified. Recommendations for optimisation of synthetic protocols to increase the yield of target products were developed. Conclusions. Based on the study, it was found that the most promising directions for the synthesis of heterocyclic compounds based on aminothiophenes are the use of microwave radiation and multicomponent reactions, which can significantly reduce the reaction time and increase the yield of products. The key structural fragments responsible for the manifestation of specific biological activity have been identified. It is shown that modification of the amino group and introduction of additional heterocyclic fragments significantly affect the spectrum of biological action of the obtained compounds. The results of the study provide a theoretical basis for the development of new drugs based on aminothiophene derivatives and the optimisation of their synthesis methods.

Key words: aminothiophenes, heterocyclic compounds, organic synthesis, biological activity, innovative methods of synthesis.

Актуальність проблеми. Розробка нових лікарських засобів залишається одним із пріоритетних напрямків сучасної медичної та фармацевтичної хімії. Особливу увагу дослідників привертають гетероциклічні сполуки, зокрема похідні амініотіофенів, що характеризуються широким спектром біологічної активності та є перспективними об'єктами для створення інноваційних терапевтичних агентів (Parveen et al., 2022). Актуальність дослідження нових гетероциклічних сполук на основі амініотіофенів обумовлена кількома важливими факторами. По-перше, тіофенове ядро є важливим фармакофором, що входить до складу багатьох природних та синтетичних біологічно активних молекул (Thakur et al., 2024), по-друге, наявність аміногрупи в структурі таких сполук відкриває широкі можливості для подальшої хімічної модифікації та оптимізації їхніх властивостей (Fahim et al., 2024).

Сучасні дослідження демонструють, що похідні амініотіофенів проявляють протимікробну, протигрибкову, протизапальну та протипухлинну активність (Mohamed et al., 2024). Особливо важливим є пошук нових сполук

з покращеними фармакологічними властивостями та зниженою токсичністю, що можуть стати альтернативою існуючим лікарським засобам, особливо в умовах зростання антибіотикорезистентності та появи нових штамів патогенних мікроорганізмів (Sadek et al., 2023).

Інноваційні підходи до синтезу таких сполук, включаючи використання сучасних методів комбінаторної хімії, мікрохвильового синтезу та зелених технологій, дозволяють не лише оптимізувати процес отримання цільових продуктів, але й забезпечити їх структурне різноманіття для подальшого біологічного скринінгу (Xuan, 2021). Важливим аспектом є також розробка методів спрямованого синтезу, що базуються на розумінні взаємозв'язку між структурою та активністю сполук (SAR) (Luna et al., 2021). Таким чином, дослідження нових методів синтезу та вивчення біологічної дії гетероциклічних сполук на основі амініотіофенів є актуальним завданням сучасної органічної та медичної хімії, що має важливе практичне значення для розробки нових лікарських засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Синтез та дослідження біологічно активних

гетероциклічних сполук на основі амінотіофенів є одним із пріоритетних напрямів сучасної органічної та медичної хімії (Різак, Сабов, 2024; Різак, 2024). За останні роки значно зросла кількість публікацій, присвячених розробці нових методів синтезу та вивченню властивостей цього класу сполук. Проведені дослідження демонструють високу ефективність використання 2-амінотіофенів як вихідних реагентів для синтезу нових конденсованих гетероциклічних систем із потенційною протимікробною активністю (Різак, 2024). Також висвітлено розробку інноваційного підходу до синтезу тіофеновмісних 1,3,4-оксадіазолів із використанням мікрохвильового випромінювання, що дозволяє значно скоротити час реакції та підвищити вихід цільових продуктів (Сімурова, Попова, 2022).

Важливим напрямом є вивчення механізмів біологічної дії синтезованих сполук (Різак, 2023), що виявило виражену протизапальну активність деяких похідних амінотіофенів завдяки інгібуванню ключових ферментів запального процесу. Встановлено кореляцію між структурою замісників у тіофеновому кільці та антиоксидантною активністю сполук (Василенко, 2023). Особливу увагу привертають дослідження, які демонструють перспективність використання амінотіофенів для створення нових протипухлинних препаратів. У результаті синтезовано серію нових похідних і проведено їх скринінг на різних лініях ракових клітин, що дозволило визначити сполуки-лідери для їх подальшої оптимізації (Крицишин-Дилевич, 2021; Duvauchelle et al., 2023).

Мета дослідження – систематизація та критичний аналіз сучасних наукових даних щодо методів синтезу та біологічної активності нових гетероциклічних сполук на основі амінотіофенів, а також визначення перспективних напрямків подальших досліджень у цій галузі.

Робота спрямована на узагальнення інноваційних синтетичних підходів, встановлення взаємозв'язку між структурою та активністю отриманих сполук, а також оцінку їхнього потенціалу як основи для розробки нових біологічно активних речовин.

Матеріали та методи. Для підготовки цього дослідження було проведено системний аналіз наукової літератури за період 2019–2024 років, присвяченої синтезу та дослідженню біологічної

активності гетероциклічних сполук на основі амінотіофенів. Пошук здійснювався у провідних наукометричних базах даних, зокрема Scopus, Web of Science, PubMed та SciFinder.

Критеріями включення публікацій до огляду були:

- наявність детального опису методів синтезу нових гетероциклічних сполук на основі амінотіофенів;
- представлення результатів дослідження біологічної активності синтезованих сполук;
- використання сучасних методів аналізу та характеристики отриманих сполук.

Особлива увага приділялась роботам, що описують інноваційні синтетичні підходи та містять дані щодо зв'язку між структурою й активністю досліджуваних сполук. При аналізі літературних джерел оцінювались актуальність запропонованих методів синтезу, їх препаративні можливості та потенціал практичного застосування отриманих сполук.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасний розвиток медичної та фармацевтичної хімії характеризується інтенсивним пошуком нових біологічно активних сполук, що є основою для створення ефективних лікарських засобів. Особливу увагу дослідників привертають гетероциклічні сполуки, зокрема похідні тіофену, що обумовлено їхнім широким спектром біологічної активності та відносно низькою токсичністю (Abedinifar et al., 2021; Sumithra, 2023).

Амінотіофени належать до важливого класу органічних сполук, які слугують ключовими блоками для синтезу різноманітних гетероциклічних систем. Наявність аміногрупи в молекулі тіофену відкриває широкі можливості для подальших хімічних перетворень і створення нових біологічно активних молекул (Asiri, 2021). Розробка ефективних методів синтезу амінотіофенів залишається актуальним завданням органічної хімії. Традиційні підходи включають відновлення нітротіофенів, нуклеофільне заміщення галогенотіофенів і реакції cross-coupling. Останні дослідження демонструють значний прогрес у розробці нових синтетичних стратегій (Yang, 2024). Особливої уваги заслуговує метод мікрохвильового синтезу амінотіофенів, який дозволяє значно скоротити час реакції та підвищити її селективність. Використання мікрохвильового випромінювання сприяє

Таблиця 1

Інноваційні підходи до синтезу та вивчення біологічної дії нових гетероциклічних сполук на основі амінотіофенів

Аспект дослідження	Інноваційний підхід	Ключові результати	Біологічна активність
Методи синтезу	мікрохвильовий синтез амінотіофенів	скорочення часу реакції до 15–20 хв.; підвищення виходу продукту на 20–30 % екологічність процесу	не застосовується
Модифікація структури	введення фармакофорних замісників у положення 2 та 3 тіофенового кільця	отримання нових похідних з високою чистотою; оптимізація синтетичного протоколу	протизапальна активність
Механізм дії	комп'ютерне моделювання взаємодії з біомішенями	визначення механізму зв'язування з рецепторами; прогнозування біологічної активності	протимікробна та протигрибкова дія
Біологічні дослідження	високопропускний скринінг	ідентифікація найбільш активних сполук; встановлення залежності структура-активність	протипухлинна активність
«Зелена хімія»	використання екологічних розчинників та каталізаторів	зменшення впливу на навколишнє середовище; підвищення безпечності синтезу	не застосовується

Джерело: узагальнено на основі [18–27].

проведенню реакцій у більш м'яких умовах, що особливо важливо під час роботи з термічно нестабільними сполуками (Peng, 2024).

Функціоналізація амінотіофенів є ключовим етапом у створенні нових біологічно активних сполук. Сучасні дослідження демонструють різноманітні підходи до модифікації аміногрупи – ацилювання та алкілювання

залишаються найбільш поширеними методами функціоналізації. При цьому використання новітніх каталізаторів дозволяє проводити ці реакції з високою селективністю та виходом (Named, 2022). Провідні аспекти інноваційних підходів до синтезу та вивчення біологічної дії нових гетероциклічних сполук на основі амінотіофенів наведено у табл. 1.

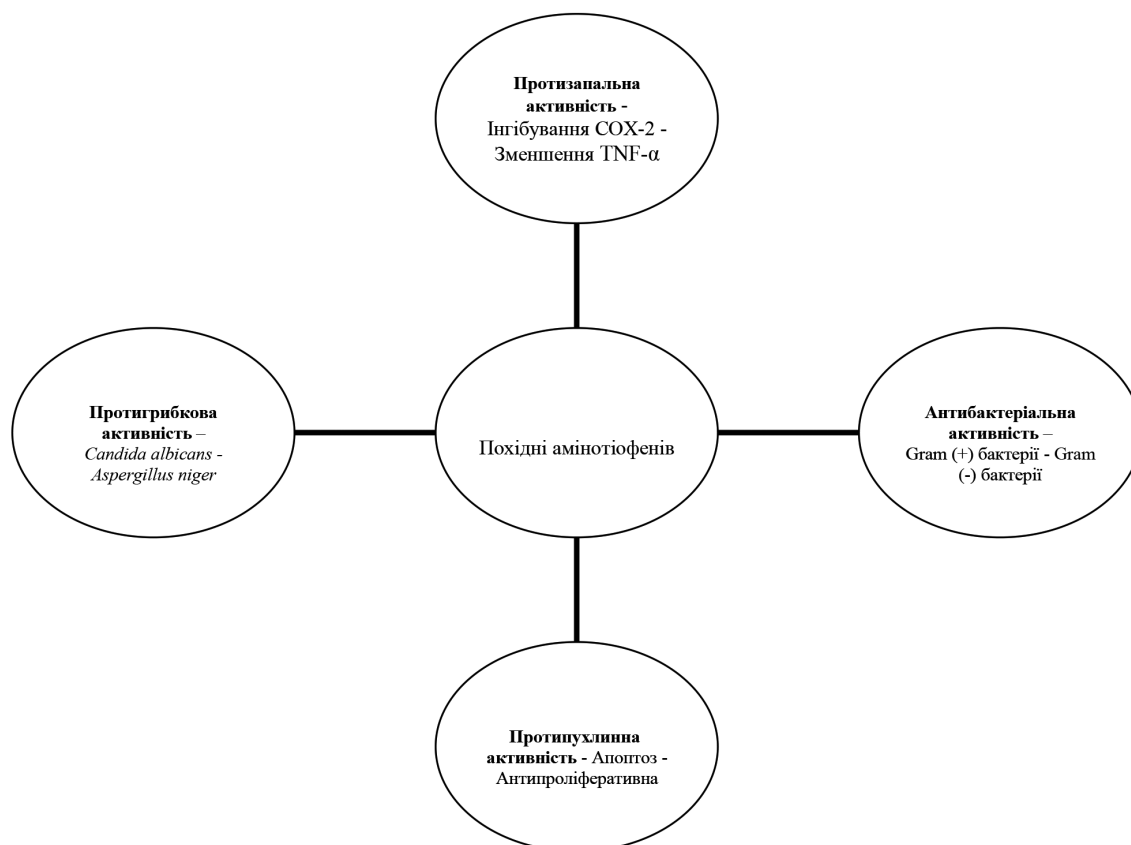


Рис. 1. Протизапальна, антибактеріальна, протигрибкова і протипухлинна активність нових гетероциклічних сполук на основі амінотіофенів

Особливий інтерес становлять реакції утворення основ Шиффа на основі амінотіофенів, які можуть бути використані для подальшої циклізації та створення складних гетероциклічних систем (Luna, 2021). Дослідження біологічної активності нових гетероциклічних сполук на основі амінотіофенів демонструють їх значний терапевтичний потенціал. Виявлено, що різні похідні проявляють протимікробну активність – ряд N-заміщених амінотіофенів показав високу активність проти грампозитивних та грамнегативних бактерій (Mehdhar, 2023); протигрибкову дію – деякі похідні демонструють значну активність проти різних видів *Candida* (Oliveira, 2022) та протизапальні властивості – встановлено, що певні похідні амінотіофенів здатні інгібувати ключові ферменти запального процесу (da Cruz, 2021) (рис. 1).

Вивчення механізмів біологічної дії нових сполук має вирішальне значення для розуміння їхнього терапевтичного потенціалу. Сучасні дослідження з використанням методів молекулярного докінгу та QSAR-аналізу дають змогу прогнозувати взаємодію синтезованих сполук із біологічними мішенями (Hossan, 2023).

Встановлено, що багато похідних амінотіофенів проявляють свою активність через інгібування специфічних ферментів, взаємодію з рецепторами клітинної мембрани та вплив на процеси передачі клітинних сигналів (Kassab, 2024).

Сучасні тенденції у розробці нових лікарських засобів вказують на необхідність створення більш селективних та ефективних сполук. У цьому контексті похідні амінотіофенів викликають особливий інтерес завдяки можливості їхньої спрямованої модифікації (Yan, 2023).

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведений аналіз літературних джерел та наукових даних щодо синтезу та біологічної активності похідних амінотіофенів дозволяє сформулювати низку важливих висновків. Розробка сучасних методів синтезу із використанням мікрохвильового випромінювання забезпечує значне вдосконалення технологічних підходів. Зокрема, застосування цього методу дозволяє суттєво скоротити час реакції, підвищити вихід цільових продуктів та уникнути використання жорстких умов, що є важливим для роботи з термічно нестабільними сполуками.

Встановлено, що фармакофорна модифікація амінотіофенів, зокрема введення замісників у положення 2 та 3 тіофенового кільця, сприяє отриманню нових сполук із високою біологічною активністю. Особливу увагу привертають похідні, які демонструють протизапальну та протимікробну активність. Такий підхід відкриває перспективи для створення нових лікарських засобів із заданими властивостями.

Комп'ютерне моделювання та молекулярний докінг відіграють ключову роль у розумінні механізмів взаємодії синтезованих сполук із біологічними мішенями. Ці методи дозволяють раціоналізувати процес дизайну лікарських засобів, що сприяє підвищенню їхньої селективності та ефективності.

Впровадження принципів «зеленої хімії» у синтез амінотіофенів забезпечує екологічну безпеку виробничих процесів. Зокрема, використання екологічних розчинників та каталізаторів відповідає сучасним вимогам до хімічного виробництва, що робить цей напрям перспективним для масштабування в промислових умовах.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розширення спектра досліджених біологічних активностей похідних амінотіофенів, зокрема їхнього протипухлинного потенціалу. Перспективними є сполуки, які поєднують у собі кілька механізмів дії, що підтверджується результатами досліджень *in vitro* та *in vivo*. Це відкриває можливості для створення ефективних терапевтичних засобів із подвійною або комбінованою дією.

Таким чином, дослідження похідних амінотіофенів демонструє їхній значний потенціал у розробці нових лікарських засобів, що потребує подальшого вивчення їхніх властивостей і масштабування синтетичних методів для практичного застосування.

Проведене дослідження створило наукове підґрунтя для подальшої розробки нових лікарських засобів на основі похідних амінотіофенів. Визначено перспективні напрямки досліджень, які спрямовані на оптимізацію структури потенційних біологічно активних сполук, що може значно підвищити ефективність і селективність їхньої дії.

Подальші дослідження мають зосередитися на розробці нових методів синтезу із застосуванням принципів «зеленої хімії». Використання екологічно безпечних технологій сприятиме

зниженню впливу на довкілля та підвищенню економічної ефективності синтетичних процесів. Особливу увагу слід приділити створенню гібридних молекул на основі амінотіофенів, які можуть поєднувати різні механізми дії для досягнення синергічного терапевтичного ефекту.

Крім того, перспективним є вивчення механізмів дії похідних амінотіофенів на молекулярному рівні, зокрема їхньої взаємодії з біологічними мішенями. Це дозволить раціоналізувати дизайн нових сполук і забезпечити більш ефективний підхід до створення лікарських засобів

із прогнозованими властивостями (Duvauchelle, 2023).

Подяка. Авторка висловлює особливу подяку чл.-кор. НАН України, д. фарм. н., д. хім. н., проф. В.П. Черних, д. хім. н., проф. Л.А. Шемчуку, д. хім. н., проф. С.М. Хрипаку, за надання можливості проведення наукових досліджень на сучасному рівні, за керування цим напрямком досліджень та обговорення їх результатів, д. біол. н., проф. Л.М. Малоштан та к. мед. н. В.В. Казмірчуку за співпрацю та проведення біологічних досліджень.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Крищин-Дилевич А. П. 4-тіазолідиони та споріднені гетероцикли в дизайні протипаразитарних та протипухлинних агентів як поліфармакологічних лікоподібних молекул: *автореф. дис. ... д-ра фармацевт. наук*: 15.00.02 / А. П. Крищин-Дилевич; Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького. Львів. 2021. 44 с.
2. Різак Г.В. Біоорганічна хімія: навч.-метод. посіб. Ужгород : ФОП Сабов А. М., 2024. 667 с.
3. Різак Г.В. Вивчення антимікробної дії етил 3-R-4-R-2-амінотіофен-3-карбоксилатів, нітрилів 3-R-4-R-2-амінотіофен-3-карбонових кислот, їх уреїдних похідних, 2, 4-діоксо-та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R'-тієно [2, 3-d] піримідинів. *Хімічні проблеми сьогодення*. 2024. С. 36–38. URL: <https://jhp.s.donnu.edu.ua/article/view/15541> (дата звернення: 20.01.2025).
4. Різак Г.В. Використання програми PASS для прогнозування біологічної активності синтезованих сполук з метою подальшого дослідження біологічних властивостей 2,4-діоксо- ТА 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R'-тієно[2,3-D]піримідинів. *Multidisciplinary wyzwania współczesnej nauki: innowacje i współpraca* (15 Wrzesień 2023 r., Polska). Futurity-Publishing. 2023. С. 355-361. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/53892> (дата звернення: 20.01.2025).
5. Різак Г.В. Методологія органічного синтезу: навч. посіб. / Ужгород : ФОП Сабов А.М. 2024. 490 с.
6. Сімурова Н., Попова І. Зручний метод одержання похідних 1,3,4-оксадіазолів. *Актуальні проблеми хімії та хімічної технології*: тези доповідей І Міжнародної науково-практичної конференції, 30 листопада 2022 р. Київ : НУХТ, 2022. С. 275–276. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/45108> (дата звернення: 20.01.2025).
7. Chitosan-Based Films with 2-Aminothiophene Derivative: Formulation, Characterization and Potential Antifungal Activity / V.d.S.Oliveira et al. *Marine Drugs*. 2022. Vol. 20, no. 2. P. 103. <https://doi.org/10.3390/md20020103> (date of access: 19.01.2025).
8. Computer-Aided drug design of new 2-amino-thiophene derivatives as anti-leishmanial agents / I.S.Luna et al. *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2023. P. 115223. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2023.115223> (date of access: 19.01.2025).
9. Design, Synthesis and Antifungal Activity of New Schiff Bases Bearing 2-Aminothiophene Derivatives Obtained by Molecular Simplification / I.Luna et al. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2021. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210004> (date of access: 19.01.2025).
10. Design, synthesis and antimicrobial activity of novel 2-aminothiophene containing cyclic and heterocyclic moieties / Y.I.Asiri et al. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*. 2021. Vol. 44. P. 128117. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2021.128117> (date of access: 19.01.2025).
11. Dual Function of 4-Aminothiophene in Surface-Enhanced Raman Scattering Application as an Internal Standard and Adsorbent for Controlling Au Nanocrystal Morphology / X.Yan et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c19390> (date of access: 19.01.2025).
12. Duvauchelle V., Meffre P., Benfodda Z. Green methodologies for the synthesis of 2-aminothiophene. *Environmental Chemistry Letters*. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01482-1> (date of access: 19.01.2025).
13. Duvauchelle V., Meffre P., Benfodda Z. Recent contribution of medicinally active 2-aminothiophenes: A privileged scaffold for drug discovery. *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2022. P. 114502. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2022.114502> (date of access: 19.01.2025).

14. Eco-Friendly Synthesis of 5-Hydroxymethylfurfural and Its Applications as a Starting Material to Synthesize Valuable Heterocyclic Compounds / H.B.Phan et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c08211> (date of access: 19.01.2025).
15. Effect of green solvents physical, chemical, biological and bonding nature on 5-acetyl-thiophene-2-carboxylic acid by DFT and TD-DFT approach – An antiviral agent / M.Sumithra et al. *Journal of the Indian Chemical Society*. 2022. P. 100867. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100867> (date of access: 19.01.2025).
16. Electrochemical oxidative C H sulfonylation of thiophenes: Site-selective access to 2-arylsulfonylthiophenes / Z.Yang et al. *Tetrahedron Letters*. 2024. P. 155208. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2024.155208> (date of access: 19.01.2025).
17. Fahim A. M., Ismael E. H. I., Tolan H. E. M. Numerous Heterocyclic Compounds with an Isonicotinic Moiety have Been Studied for Their Synthesis, Antibacterial, Anticancer, Docking Simulation, and DFT Characteristics. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2023. P. 1–42. <https://doi.org/10.1080/10406638.2023.2266549> (date of access: 19.01.2025).
18. Green synthesis of biologically important 2-aminothiophenes by the mediation of ZnO@SiO₂-NH₂ nanoparticle as an important anti-liver cancer alternative for valproate / F. Gao et al. *Chemical Papers*. 2021. Vol. 75, no. 6. P. 2647–2654. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01509-x> (date of access: 19.01.2025).
19. Heterocyclization of 2-thiophenamine: Design of novel thiophene with azole and azine moieties / E.Hamed et al. *Bulletin of Faculty of Science, Zagazig University*. 2022. Vol. 2022, no. 2. P. 47–56. <https://doi.org/10.21608/bfszu.2022.130929.1123> (date of access: 19.01.2025).
20. Investigating the antimicrobial and anti-inflammatory activities of novel thiophene derivatives by in-vitro studies, molecular docking, spectral analysis, and quantum chemical calculations / M.A.F.Mohamed et al. *Journal of Molecular Structure*. 2024. P. 137810. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.137810> (date of access: 19.01.2025).
21. Kassab A. E., Gedawy E. M., Sayed A. S. Fused thiophene as a privileged scaffold: A review on anti-Alzheimer's disease potentials via targeting cholinesterases, monoamine oxidases, glycogen synthase kinase-3, and Aβ aggregation. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. P. 131018. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131018> (date of access: 20.01.2025).
22. Kralj S., Jukić M., Bren U. Molecular Filters in Medicinal Chemistry. *Encyclopedia*. 2023. Vol. 3, no. 2. P. 501–511. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3020035> (date of access: 19.01.2025).
23. Medicinal chemistry-based perspective on thiophene and its derivatives: Exploring the structural insights to discover plausible druggable leads / S. Thakur et al. *RSC Medicinal Chemistry*. 2024. <https://doi.org/10.1039/d4md00450g> (date of access: 19.01.2025).
24. Microwave-assisted synthesis of biodegradable and antibacterial thiophene, furan and thiazole derivatives / M. Rosales-Hurtado et al. *Environmental Chemistry Letters*. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01522-w> (date of access: 19.01.2025).
25. N-, O- and S-Heterocycles Synthesis in Deep Eutectic Solvents / S. Perrone et al. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 8. P. 3459. <https://doi.org/10.3390/molecules28083459> (date of access: 19.01.2025).
26. Parveen A., Sharma P., Vishnoi G., Gaur K., Jough S. S., Arya M. An updated review on synthetic features, chemical sciences, and pharmacological implications of the 2-aminothiophene derivatives. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*. 2022. P. 1810–1825.
27. Recent Achievement in the Synthesis of Imidazoles / T. T. Hieu et al. *Current Organic Chemistry*. 2023. Vol. 27. <https://doi.org/10.2174/0113852728259414231010050749> (date of access: 19.01.2025).
28. Recent Developments in the Synthesis of Hybrid Heterocycles, A Promising Approach to Develop Multi-target Antibacterial Agents. / K. U. Sadek et al. *Journal of Molecular Structure*. 2023. P. 135616. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135616> (date of access: 19.01.2025).
29. Recent strategies in the synthesis of thiophene derivatives: highlights from the 2012–2020 literature / F. Abedinifar et al. *Molecular Diversity*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11030-020-10128-9> (date of access: 19.01.2025).
30. Structure–Activity Relationship Studies of Antimalarial *Plasmodium* Proteasome Inhibitors—Part II / H. Zhang et al. *Journal of Medicinal Chemistry*. 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.2c01651> (date of access: 19.01.2025).
31. Syntheses of Thiophenes - Recent Advances / X. Peng et al. *Asian Journal of Organic Chemistry*. 2024. <https://doi.org/10.1002/ajoc.202300631> (date of access: 19.01.2025).
32. Synthesis of New Substituted Thiophene Derivatives and Evaluating their Antibacterial and Antioxidant Activities / F. S. Mehdhar et al. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2022. P. 1–16. <https://doi.org/10.1080/10406638.2022.2092518> (date of access: 19.01.2025).

33. Synthesis, Characterization, Crystal Structure, Hirshfeld Surface, Electronic Excitation, Molecular Docking, and DFT Studies on 2-Amino Thiophene Derivative / A. Fatima et al. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2022. P. 1–32. <https://doi.org/10.1080/10406638.2022.2032769> (date of access: 19.01.2025).
34. Synthesis, molecular modelling and biological evaluation of new 4-aminothiophene and thienopyrimidine compounds / A. Hossan et al. *Journal of Taibah University for Science*. 2023. Vol. 17, no. 1. <https://doi.org/10.1080/16583655.2023.2164993> (date of access: 19.01.2025).
35. Synthesis, molecular modelling, and anticancer activity of new thiophene and thiophene-pyrazole analogues incorporating benzene-sulfonamide moiety as carbonic anhydrase isozymes (CA-IX and CA-XII) / A. I. Alalawy et al. *Journal of Molecular Structure*. 2023. P. 136609. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.136609> (date of access: 19.01.2025).
36. Thiophene-Based Compounds with Potential Anti-Inflammatory Activity / R. M. D. da Cruz et al. *Pharmaceuticals*. 2021. Vol. 14, no. 7. P. 692. <https://doi.org/10.3390/ph14070692> (date of access: 19.01.2025).

REFERENCES:

1. Kryshchysyn-Dylevych, A. P. (2021). 4-thiazolidinones and related heterocycles in the design of antiparasitic and anticancer agents as polypharmacological drug-like molecules: Abstract of dissertation for Doctor of Pharmaceutical Sciences: 15.00.02. Lviv National Medical University named after Danylo Halytskyi, Lviv. [in Ukrainian].
2. Rizak, H. V. (2024). *Bioorganichna khimiia: navch.-metod. posib. [Bioorganic chemistry: Educational and methodological manual]*. Uzhhorod: FOP Sabov A. M. [in Ukrainian].
3. Rizak, H. V. (2024). Vyvchennia antymikrobnii dii etyl 3-R-4-R-2-aminitiofen-3-karboksylativ, nitryliv 3-R-4-R-2-aminitiofen-3-karbonovykh kyslot, yikh ureidnykh pokhidnykh, 2,4-diokso-ta 4-imino-2-okso-3-fenil-5-R-6-R'-tieno[2,3-d]pyrimidyniv [Study of the antimicrobial action of ethyl 3-R-4-R-2-aminothiophene-3-carboxylates, nitriles of 3-R-4-R-2-aminothiophene-3-carboxylic acids, their ureide derivatives, 2,4-dioxo- and 4-imino-2-oxo-3-phenyl-5-R-6-R'-thieno[2,3-d]pyrimidines]. *Khimichni problemy sohodennia – Chemical Problems of Today*, 2024, 36–38. Retrieved from <https://jhps.donnu.edu.ua/article/view/15541> [in Ukrainian].
4. Rizak, H. V. (2023). Vykorystannia prohramy PASS dlia prohnozuvannia biolohichnoi aktyvnosti syntezovanykh spoluk z metoiu podalshoho doslidzhennia biolohichnykh vlastyvostei 2,4-diokso- ta 4-imino-2-okso-3-fenil-5-R-6-R'-tieno[2,3-D]pyrimidyniv [Use of the PASS program for predicting the biological activity of synthesized compounds for further study of the biological properties of 2,4-dioxo- and 4-imino-2-oxo-3-phenyl-5-R-6-R'-thieno[2,3-D]pyrimidines]. *Multidyscyplinarne wyzwania współczesnej nauki: innowacje i współpraca (15 Wrzesień 2023 r., Polska)* (pp. 355–361). Futurity-Publishing. Retrieved from <https://dSPACE.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/53892> [in Ukrainian].
5. Rizak, H. V. (2024). *Metodolohiia orhanichnoho syntesu: navch. posib. [Methodology of organic synthesis: Textbook]*. Uzhhorod: FOP Sabov A. M. [in Ukrainian].
6. Simurova, N., & Popova, I. (2022). Zruchnyi metod oderzhannia pokhidnykh 1,3,4-oksadiazoliv [A convenient method for obtaining 1,3,4-oxadiazole derivatives]. *Aktualni problemy khimii ta khimichnoi tekhnolohii: tezy dopovidei I Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 30 lystopada 2022 r.* (pp. 275–276). NUFT. Retrieved from <https://dSPACE.nuft.edu.ua/handle/123456789/45108> [in Ukrainian].
7. Oliveira, V. d. S., et al. (2022). Chitosan-based films with 2-aminothiophene derivative: Formulation, characterization and potential antifungal activity. *Marine Drugs*, 20(2), 103. <https://doi.org/10.3390/md20020103>
8. Luna, I. S., et al. (2023). Computer-aided drug design of new 2-amino-thiophene derivatives as anti-leishmanial agents. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 115223. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2023.115223>
9. Luna, I., et al. (2021). Design, synthesis and antifungal activity of new Schiff bases bearing 2-aminothiophene derivatives obtained by molecular simplification. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210004>
10. Asiri, Y. I., Muhsinah, A. B., Alsayari, A., Venkatesan, K., Al-Ghorbani, M., & Mabkhot, Y. N. (2021). Design, synthesis and antimicrobial activity of novel 2-aminothiophene containing cyclic and heterocyclic moieties. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 44, 128117. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2021.128117>
11. Yan, X., Zhao, H., Shi, X., Yang, Z., & Ma, J. (2023). Dual Function of 4-Aminothiophene in Surface-Enhanced Raman Scattering Application as an Internal Standard and Adsorbent for Controlling Au Nanocrystal Morphology. *ACS Applied Materials & Interfaces*. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c19390>
12. Duvauchelle, V., Meffre, P., & Benfodda, Z. (2022). Green methodologies for the synthesis of 2-aminothiophene. *Environmental Chemistry Letters*. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01482-1>
13. Phan, H. B., Luong, C. M., Nguyen, L. P., Bui, B. T., Nguyen, H. T., Mai, B. V., Mai, T. V. T., Huynh, L. K., & Tran, P. H. (2022). Eco-Friendly Synthesis of 5-Hydroxymethylfurfural and Its Applications as a Starting Material to Synthesize Valuable Heterocyclic Compounds. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c08211>

14. Sumithra, M., Sundaraganesan, N., Venkata Prasad, K., Rajesh, R., Vetrivelan, V., Ilangoan, V., Irfan, A., & Muthu, S. (2022). Effect of green solvents physical, chemical, biological and bonding nature on 5-acetyl-thiophene-2-carboxylic acid by DFT and TD-DFT approach – An antiviral agent. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100867. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100867>
15. Yang, Z., Qiao, Z., Yu, X., Yang, H., Yuan, M., & Jin, Y. (2024). Electrochemical oxidative CH sulfonylation of thiophenes: Site-selective access to 2-arylsulfonylthiophenes. *Tetrahedron Letters*, 155208. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2024.155208>
16. Fahim, A.M., Ismael, E.H.I., & Tolan, H.E.M. (2023). Numerous heterocyclic compounds with an isonicotinic moiety have been studied for their synthesis, antibacterial, anticancer, docking simulation, and DFT characteristics. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 1–42. URL: <https://doi.org/10.1080/10406638.2023.2266549>
17. Gao, F., Yang, J., Geng, Y., Liu, B., Zhang, R., & Zhang, M. (2021). Green synthesis of biologically important 2-aminothiophenes by the mediation of ZnO@SiO₂-NH₂ nanoparticle as an important anti-liver cancer alternative for valproate. *Chemical Papers*, 75(6), 2647–2654. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01509-x>
18. Hamed, E., Assy, M., El-Said, E., & Shehta, W. (2022). Heterocyclization of 2-thiophenamine: Design of novel thiophene with azole and azine moieties. *Bulletin of Faculty of Science, Zagazig University*, 2022(2), 47–56. <https://doi.org/10.21608/bfszu.2022.130929.1123>
19. Mohamed, M.A.F., Roy, N., Benjamin, I., Joo, S.W., Musthafa, Y.M.M., Ghfar, A.A., Obunukwu, G.M., Akor, F.O., & Louis, H. (2024). Investigating the antimicrobial and anti-inflammatory activities of novel thiophene derivatives by in-vitro studies, molecular docking, spectral analysis, and quantum chemical calculations. *Journal of Molecular Structure*, 137810. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.137810>
20. Kassab, A.E., Gedawy, E.M., & Sayed, A.S. (2024). Fused thiophene as a privileged scaffold: A review on anti-Alzheimer's disease potentials via targeting cholinesterases, monoamine oxidases, glycogen synthase kinase-3, and A β aggregation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 131018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131018>
21. Kralj, S., Jukić, M., & Bren, U. (2023). Molecular filters in medicinal chemistry. *Encyclopedia*, 3(2), 501–511. URL: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3020035>
22. Thakur, S., Kumar, D., Jaiswal, S., Goel, K.K., Rawat, P., Srivastava, V., Dhiman, S., R Jadhav, H., & Dwivedi, A.R. (2024). Medicinal chemistry-based perspective on thiophene and its derivatives: Exploring the structural insights to discover plausible druggable leads. *RSC Medicinal Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/d4md00450g>
23. Rosales-Hurtado, M., Duvauchelle, V., Bénimélys, D., Ogawa-Okada, M., Yamamoto, N., Meffre, P., Szurmant, H., & Benfodda, Z. (2022). Microwave-assisted synthesis of biodegradable and antibacterial thiophene, furan and thiazole derivatives. *Environmental Chemistry Letters*. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01522-w>
24. Perrone, S., Messa, F., Troisi, L., & Salomone, A. (2023). N-, O- and S-Heterocycles Synthesis in Deep Eutectic Solvents. *Molecules*, 28(8), 3459. <https://doi.org/10.3390/molecules28083459>
25. Parveen, A., Sharma, P., Vishnoi, G., Gaur, K., Jough, S. S., & Arya, M. (2022). An updated review on synthetic features, chemical sciences, and pharmacological implications of the 2-aminothiophene derivatives. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 1810–1825
26. Hieu, T.T., Dung, V.C., Chung, N.T., & Duc, D.X. (2023). Recent Achievement in the Synthesis of Imidazoles. *Current Organic Chemistry*, 27. <https://doi.org/10.2174/0113852728259414231010050749> (date of access: 19.01.2025).
27. Sadek, K.U., Mekheimer, R.A., Abd-Elmonem, M., Abo-Elsoud, F.A., Hayallah, A.M., Mostafa, S.M., Abdellattif, M.H., Abourehab, M.A.S., Farghaly, T.A., & Elkamhawy, A. (2023). Recent Developments in the Synthesis of Hybrid Heterocycles, A Promising Approach to Develop Multi-target Antibacterial Agents. *Journal of Molecular Structure*, 135616. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135616>
28. Abedinifar, F., Babazadeh Rezaei, E., Biglar, M., Larijani, B., Hamedifar, H., Ansari, S., & Mahdavi, M. (2020). Recent strategies in the synthesis of thiophene derivatives: highlights from the 2012–2020 literature. *Molecular Diversity*. <https://doi.org/10.1007/s11030-020-10128-9>
29. Zhang, H., Ginn, J., Zhan, W., Leung, A., Liu, Y.J., Toita, A., Okamoto, R., Wong, T.-T., Imaeda, T., Hara, R., Michino, M., Yukawa, T., Chelebieva, S., Tumwebaze, P.K., Vendome, J., Beuming, T., Sato, K., Aso, K., Rosenthal, P.J., ... Lin, G. (2023). Structure–Activity Relationship Studies of Antimalarial *Plasmodium* Proteasome Inhibitors–Part II. *Journal of Medicinal Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.2c01651>
30. Peng, X., Yin, G., Wu, K., Wu, G., Chen, J., & Wang, Z. (2024). Syntheses of Thiophenes - Recent Advances. *Asian Journal of Organic Chemistry*. <https://doi.org/10.1002/ajoc.202300631>
31. Mehdar, F.S., Abdel-Galil, E., Saeed, A., Abdel-Latif, E., & Abd El Ghani, G.E. (2022). Synthesis of New Substituted Thiophene Derivatives and Evaluating their Antibacterial and Antioxidant Activities. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/10406638.2022.2092518>

32. Fatima, A., Khanum, G., Verma, I., Butcher, R. J., Siddiqui, N., Srivastava, S. K., & Javed, S. (2022). Synthesis, Characterization, Crystal Structure, Hirshfeld Surface, Electronic Excitation, Molecular Docking, and DFT Studies on 2-Amino Thiophene Derivative. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 1–32. <https://doi.org/10.1080/10406638.2022.2032769>
33. Hossan, A., Alsahag, M., Alisaac, A., Bamaga, M.A., Alalawy, A.I., & El-Metwaly, N.M. (2023). Synthesis, molecular modelling and biological evaluation of new 4-aminothiophene and thienopyrimidine compounds. *Journal of Taibah University for Science*, 17(1). <https://doi.org/10.1080/16583655.2023.2164993>
34. Alalawy, A.I., Alatawi, K., Alenazi, N.A., Qarah, A.F., Alatawi, O.M., Alnoman, R.B., Alharbi, A., & El-Metwaly, N.M. (2023). Synthesis, molecular modelling, and anticancer activity of new thiophene and thiophene-pyrazole analogues incorporating benzene-sulfonamide moiety as carbonic anhydrase isozymes (CA-IX and CA-XII). *Journal of Molecular Structure*, 136609. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.136609>
35. da Cruz, R. M. D., Mendonça-Junior, F. J. B., de Mélo, N. B., Scotti, L., de Araújo, R. S. A., de Almeida, R. N., & de Moura, R. O. (2021). Thiophene-Based Compounds with Potential Anti-Inflammatory Activity. *Pharmaceuticals*, 14(7), 692. <https://doi.org/10.3390/ph14070692>

УДК 544

DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-6>**Андрій СЕЛЕЗЕНЬ***доктор філософії в галузі хімії, старший викладач кафедри хімії та фізики, Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028***ORCID:** 0000-0002-1174-7439**Любомир ГУЛАЙ***доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025***ORCID:** 0000-0003-3495-5027**Микола МОРОЗ***доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри хімії та фізики, Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028***ORCID:** 0000-0003-1639-4713**Людмила ПІСКАЧ***кандидат хімічних наук, професор, професор кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025***ORCID:** 0000-0003-3117-4006

Бібліографічний опис статті: Селезень, А., Гулай, Л., Мороз, М., Піскач, Л. (2025). Взаємодії в системах $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{Zn}(\text{Cd}, \text{Hg})\text{Se}-\text{GeSe}_2$. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 41–49, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-6>

ВЗАЄМОДІЇ В СИСТЕМАХ $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{Zn}(\text{Cd}, \text{Hg})\text{Se}-\text{GeSe}_2$

Методами рентгенофазового, диференційно-термічного та мікροструктурного аналізів досліджено характер фізико-хімічної взаємодії в квазіпотрійних системах $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{Zn}(\text{Cd}, \text{Hg})\text{Se}-\text{GeSe}_2$, в яких виявлено п'ять нових тетрарних сполук: $\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$, $\text{Ti}_2\text{CdGe}_3\text{Se}_8$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$, $\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$ та $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$.

На ізотермічному перерізі системи $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{ZnSe}-\text{GeSe}_2$ при 570 К встановлено існування 7 незначних однофазних областей. Вони відповідають α -, β -, γ -, δ -, ϵ -, η – твердим розчинам на основі Ti_2Se , ZnSe , GeSe_2 , Ti_4GeSe_4 , Ti_2GeSe_3 та $\text{Ti}_2\text{Ge}_2\text{Se}_5$ відповідно та сполуці $\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$. Ці однофазні поля розділяються за допомогою 12 двофазних, між якими є 6 трифазних областей (α - β - δ , δ - β - ϵ , ϵ - β - $\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$, ϵ - $\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$ - η , η - $\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$ - γ , γ - $\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$ - β). Встановлено характер фізико-хімічної взаємодії на перерізі $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{ZnSe}$, діаграма стану якого належить до перитектичного типу ($L_p + \beta \leftrightarrow \alpha$).

Ізотермічний переріз системи $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{CdSe}-\text{GeSe}_2$ при 570 К містить 9 однофазних областей: α , β , γ , δ , ϵ , η , ζ , σ та θ . Ці поля відповідають твердим розчинам на основі сполук Ti_2Se , CdSe , GeSe_2 , Ti_4GeSe_4 , Ti_2GeSe_3 , $\text{Ti}_2\text{Ge}_2\text{Se}_5$, Cd_4GeSe_6 , $\text{Ti}_2\text{CdGe}_3\text{Se}_8$ та $\text{Ti}_2\text{CdGe}_3\text{Se}_8$ відповідно. Вони розділені 17 двофазними рівновагами, між якими є 9 трифазних областей (α - β - δ , δ - β - σ , δ - σ - ϵ , ϵ - σ - θ , ϵ - θ - η , η - θ - γ , γ - θ - ζ , θ - β - ζ , σ - β - θ). Переріз $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{CdSe}$ евтектичного типу ($L_e \leftrightarrow \alpha + \beta$) з незначною розчинністю.

При 520 К концентраційний трикутник квазіпотрійної системи $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{HgSe}-\text{GeSe}_2$ містить 10 однофазних полів: α -, β -, γ -твердих розчинів на основі бінарних сполук Ti_2Se , HgSe , GeSe_2 ; δ -, ϵ -, η -твердих розчинів на основі тернарних сполук Ti_4GeSe_4 , Ti_2GeSe_3 , $\text{Ti}_2\text{Ge}_2\text{Se}_5$ відповідно та ще чотирьох сполук: $\text{Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4$, Hg_2GeSe_4 , $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$. Ці поля розділяються 19 двофазними рівновагами (α - $\text{Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4$, $\text{Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4$ - β , α - δ , δ - ϵ , ϵ - η , η - γ , γ - Hg_2GeSe_4 , Hg_2GeSe_4 - β , δ - $\text{Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4$, δ - β , δ - $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4$, ϵ - $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4$, η - $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4$, η - $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$ - γ , $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$ - β , $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$ - Hg_2GeSe_4 , $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$ - $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4$), між якими є 10 трифазних областей.

Рентгенівським методом порошкової дифракції досліджена кристалічна структура для тетрарних сполук $\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$ та $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$. Дані халькогеніди є ізоструктурними та кристалізуються в ромбічній сингонії $\text{P}2_12_12_1$ ($\text{CT Cs}_2\text{CdGe}_3\text{Se}_8$).

Ключові слова: квазіпотрійна система, ізотермічний переріз, політермічний переріз, фазові рівноваги, тверді розчини, тетрарні сполуки.

Andrii SELEZEN

Doctor of Philosophy in Chemistry, Senior Lecturer at the Department of Chemistry and Physics,
National University of Water and Environmental Engineering, 11 Soborna str., Rivne, Ukraine, 33028
ORCID: 0000-0002-1174-7439

Lyubomyr GULAY

Doctor of Sciences in Chemistry, Professor, Head of the Department of Inorganic and Physical Chemistry,
Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025
ORCID: 0000-0003-3495-5027

Mykola MOROZ

Doctor of Sciences in Chemistry, Professor, Head of the Department of Chemistry and Physics,
National University of Water and Environmental Engineering, 11 Soborna str., Rivne, Ukraine, 33028
ORCID: 0000-0003-1639-4713

Lyudmyla PISKACH

Candidate of Chemical Sciences, Professor, 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: Selezen, A., Gulay, L., Moroz, M., Piskach, L. (2025). Vzayemodii v systemakh $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{Zn}(\text{Cd}, \text{Hg})\text{Se}-\text{GeSe}_2$ [Interactions in the $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{Zn}(\text{Cd}, \text{Hg})\text{Se}-\text{GeSe}_2$ systems]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 41–49, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-6>

INTERACTIONS IN THE $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{Zn}(\text{Cd}, \text{Hg})\text{Se}-\text{GeSe}_2$ SYSTEMS

The nature of the physicochemical interaction in the quasi-ternary $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{Zn}(\text{Cd}, \text{Hg})\text{Se}-\text{GeSe}_2$ systems was studied using X-ray diffraction, differential thermal analysis, and microstructural analysis. Five new quaternary compounds were discovered in these systems: $\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$, $\text{Ti}_2\text{CdGe}_3\text{Se}_4$, $\text{Ti}_2\text{CdGe}_3\text{Se}_8$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4$, and $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$.

The existence of 7 small single-phase regions on the isothermal section of the $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{ZnSe}-\text{GeSe}_2$ system was established at 570 K. They correspond to α , β , γ , δ , ϵ , η – solid solutions based on Ti_2Se , ZnSe , GeSe_2 , Ti_4GeSe_4 , Ti_2GeSe_3 , respectively, and on the $\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$ compound. These single-phase fields are separated by 12 two-phase fields, between which there are 6 three-phase regions ($\alpha-\beta-\delta$, $\delta-\beta-\epsilon$, $\epsilon-\beta-\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$, $\epsilon-\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8-\eta$, $\eta-\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8-\gamma$, $\gamma-\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8-\beta$). The nature of the physicochemical interaction in the $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{ZnSe}$ section has been established, and the type of phase diagram is categorized as peritectic ($L_p + \beta \leftrightarrow \alpha$).

The isothermal section of the $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{CdSe}-\text{GeSe}_2$ system at 570 K contains 9 single-phase regions: α , β , γ , δ , ϵ , η , ζ , σ , and θ . These fields correspond to solid solutions based on the compounds Ti_2Se , CdSe , GeSe_2 , Ti_4GeSe_4 , Ti_2GeSe_3 , $\text{Ti}_2\text{Ge}_2\text{Se}_5$, Cd_4GeSe_6 , $\text{Ti}_2\text{CdGe}_3\text{Se}_4$, and $\text{Ti}_2\text{CdGe}_3\text{Se}_8$, respectively. They are separated by 17 two-phase equilibria, between which there are 9 three-phase regions ($\alpha-\beta-\delta$, $\delta-\beta-\sigma$, $\delta-\sigma-\epsilon$, $\epsilon-\sigma-\theta$, $\epsilon-\theta-\eta$, $\eta-\theta-\gamma$, $\gamma-\theta-\zeta$, $\theta-\beta-\zeta$, $\sigma-\beta-\theta$). The $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{CdSe}$ section belongs to a eutectic type ($L_e \leftrightarrow \alpha + \beta$) with negligible solubility.

The concentration triangle of the quasi-ternary system $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{HgSe}-\text{GeSe}_2$ at 520 K contains 10 single-phase fields: α -, β -, γ -solid solutions based on binary compounds Ti_2Se , HgSe , GeSe_2 ; δ -, ϵ -, η -solid solutions based on ternary compounds Ti_4GeSe_4 , Ti_2GeSe_3 , $\text{Ti}_2\text{Ge}_2\text{Se}_5$, respectively, and four more compounds: $\text{Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4$, Hg_2GeSe_4 , $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$. They are divided by 19 two-phase equilibria ($\alpha-\text{Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4$, $\text{Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4-\beta$, $\alpha-\delta$, $\delta-\epsilon$, $\epsilon-\eta$, $\eta-\gamma$, $\gamma-\text{Hg}_2\text{GeSe}_4$, $\text{Hg}_2\text{GeSe}_4-\beta$, $\delta-\text{Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4$, $\delta-\beta$, $\delta-\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4$, $\epsilon-\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4$, $\eta-\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4$, $\eta-\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8-\gamma$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4-\beta$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8-\beta$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8-\text{Hg}_2\text{GeSe}_4$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_4-\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$), between which there are 10 three-phase regions.

The crystal structure of the $\text{Ti}_2\text{ZnGe}_3\text{Se}_8$ and $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$ quaternary compounds was investigated by X-ray powder diffraction. These chalcogenides are isostructural and crystallize in the orthorhombic system $SG P2_12_12_1$ ($STC_{\text{S}_2}\text{CdGe}_3\text{Se}_8$).

Key words: quasi-ternary system, isothermal section, polythermal section, phase equilibria, solid solutions, quaternary compounds.

Вступ. Вивчення складних систем, компонентами у яких виступають бінарні напівпровідникові сполуки, є одним із напрямків пошуку

нових напівпровідникових фаз. До таких систем відносяться халькогенідні системи типу $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{Zn}(\text{Cd}, \text{Hg})\text{Se}-\text{GeSe}_2$. Бінарні халькогеніди Zn ,

Cd чи Hg, а також їх тернарні і тетрарні похідні, є класичними матеріалами для напівпровідникової техніки і займають важливе місце серед матеріалів, що використовуються в нелінійній оптиці (Massalski, 1990; Kováč, 2003; McGuire, 2005; Vasilyev, 2013), ІЧ-оптоелектроніці, термо- та електрохімії та ін. (Pielmeier, 2015; Рибалка, 2019; Lonchakov, 2021; Moroz, 2022; Cirignano, 2025). Їх дослідження є актуальною проблемою, вирішення якої дозволить виявити нові фази, дослідити їх кристалічну структуру, природу утворення, запропонувати методи і умови вирощування кристалів, вивчити їх фізико-хімічні властивості.

У літературі також відомо про аналогічні дослідження рівноваг у значній кількості халькогенідних систем типу $A^I X-B^{II} X-GeX_2$ ($B^{II} = Zn, Cd, Hg; X = S, Se, Te$) за участю Талію та Купруму (Mozolyuk, 2013; Parasyuk, 2005; Piskach, 2000; Parasyuk, 2001; Romanyuk, 2003; Olekseyuk, 2005; Marchuk, 2008), а також Аргентуму (Piskach, 1998; Moroz, 2017; Parasyuk, 2003). Майже у всіх цих системах на перерізах $A^I_2GeSe_3-B^{II}Se$ виявлено ізоструктурні сполуки типу $A^I_2B^{II}GeSe_4$ тетрагональної структури (просторова група $I-42m$). Сполук зі співвідношенням елементів 2:1:3:8 не встановлено.

Експериментальна частина. Синтезували зразки високотемпературним методом у муфельній печі МП-60 сплавляючи прості речовини: талій, цинк, кадмій, германій, селен (щонайменше 99,99 ваг.% чистоти) та меркурій селенід у вакуумованих ($1 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст.) та відпаяних ампулах із кварцу. Зразки нагрівали до 1270 К зі швидкістю 10 К/год, 7 год витримували та охолоджували до 570 К зі швидкістю 6 К/год. Гомогенізуючий відпал при цьому був 350 год. Далі загартувували у 20%-ий водний розчин NaCl.

Фазовий склад встановлювали методами рентгенофазового (РФА) та мікроструктурного аналізів (МСА). Рентгенограми зразків знімали на дифрактометрі DRON 4-13 (Ка-випромінювання, $10^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$, крок $0,05^\circ$, 5 с у кожній точці. Для структурних обчислень параметри наступні $10^\circ \leq 2\theta \leq 100^\circ$, крок $0,05^\circ$, експозиція 20 с. Кристалічна структура нових тетрарних сполук розрахована методом Рітвельда. Мікроструктуру досліджували на мікротвердометрі Leica VMHT Auto. Фазові

діаграми будували за результатами диференційно-термічного аналізу (ДТА) з використанням установки Термодент Т-04 фірми «Progret».

Виклад основного матеріалу дослідження.

При вивченні взаємодії в квазіпотрійних системах $Tl_2Se-Cd(Hg)Se-GeSe_2$ при 570 К (для кадмієвмісної системи) і при 520 К (для меркурієвмісної системи) встановлено утворення тетрарних сполук $Tl_2Cd(Hg)GeSe_4$ при еквімолярному співвідношенні бінарних компонентів на перерізах $Tl_2GeSe_3-Cd(Hg)Se$ та $Tl_2Cd(Hg)Ge_3Se_8$. При співвідношенні 1:1:3 на перерізах « $Tl_2Cd(Hg)Se_2$ »– $GeSe_2$. Триангулюючими у цих системах є по два перерізи $Tl_4GeSe_4-Cd(Hg)Se$ та $Tl_2GeSe_3-Cd(Hg)Se$. Всі інші рівноваги двофазні лише в підсолідусній області.

Характер фазових рівноваг в системі $Tl_2Se-CdSe-GeSe_2$ представлено в роботах (Selezen, 2020; Олексеюк, 2021). Після уточнення взаємодії в частині $CdSe-Tl_2CdGeSe_4-Tl_2CdGe_3Se_8-Cd_4GeSe_6$ оновлений ізотермічний переріз при 570 К наведено на рис. 1 (Селезень, 2024). При температурі відпалу у цій квазіпотрійній системі є дев'ять однофазних областей, котрі відповідають α , β , γ , δ , ϵ , η , ζ , σ , θ -твердим розчинам на основі сполук Tl_2Se , $CdSe$, $GeSe_2$, Tl_4GeSe_4 , Tl_2GeSe_3 , $Tl_2Ge_2Se_5$, Cd_4GeSe_6 , $Tl_2CdGeSe_4$ та $Tl_2CdGe_3Se_8$ відповідно. Ці однофазні поля є розділеними за допомогою 17 двофазних рівноваг, між якими є дев'ять трифазних областей ($\alpha-\beta-\delta$, $\delta-\beta-\sigma$, $\delta-\sigma-\epsilon$, $\epsilon-\sigma-\theta$, $\epsilon-\theta-\eta$, $\eta-\theta-\gamma$, $\gamma-\theta-\zeta$, $\theta-\beta-\zeta$, $\sigma-\beta-\theta$). Розчинність на основі $CdSe$ становить близько 5 мол.%, на основі інших сполук менше 3 мол.% (Селезень, 2024).

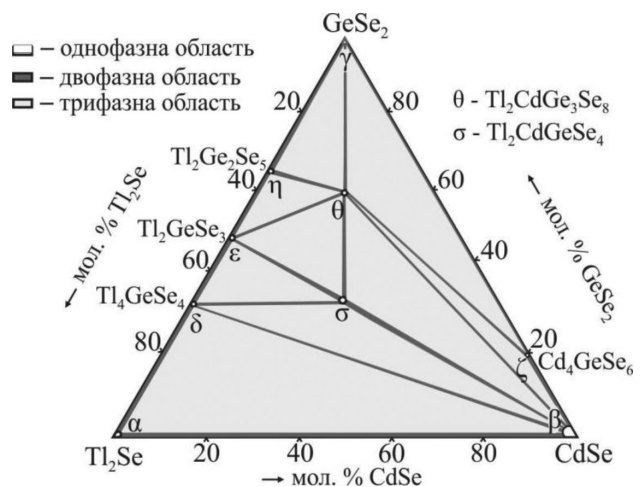


Рис. 1. Ізотермічний переріз системи $Tl_2Se-CdSe-GeSe_2$ при 570 К (Селезень, 2024)

З літературних джерел відомо про декілька варіантів побудови системи $Tl_2Se-CdSe$, що відрізняються між собою характером фазових рівноваг та методами дослідження (Guseinov, 1981; Mucha, 2011). Згідно результатів РФА встановлено, що у системі при 570 К утворюються граничні тверді розчини: α – на основі сполуки Tl_2Se (ПГ $P4/ncc$), β – на основі сполуки $CdSe$ (ПГ $P6_3mc$), зразки між ними є двофазними; існування сполуки складу $Tl_{16}Cd_3Se_{11}$, яка наведена в роботі (Mucha, 2011), не підтверджено (рис. 2).

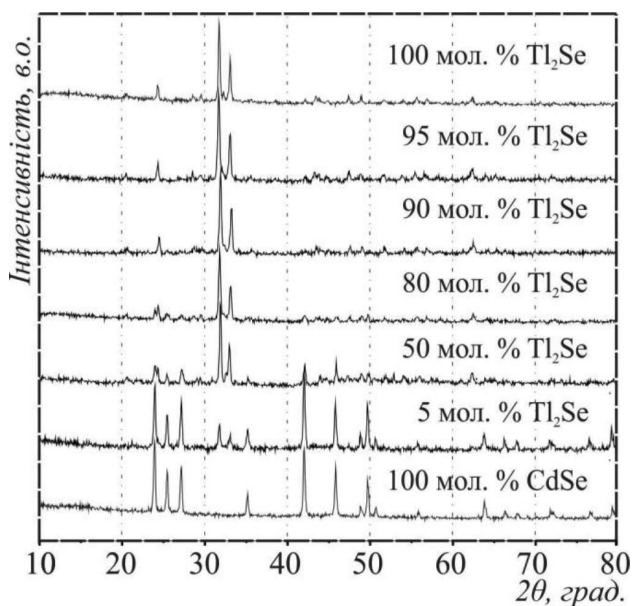


Рис. 2. Дифрактограми зразків системи $Tl_2Se-CdSe$ (Селезень, 2024)

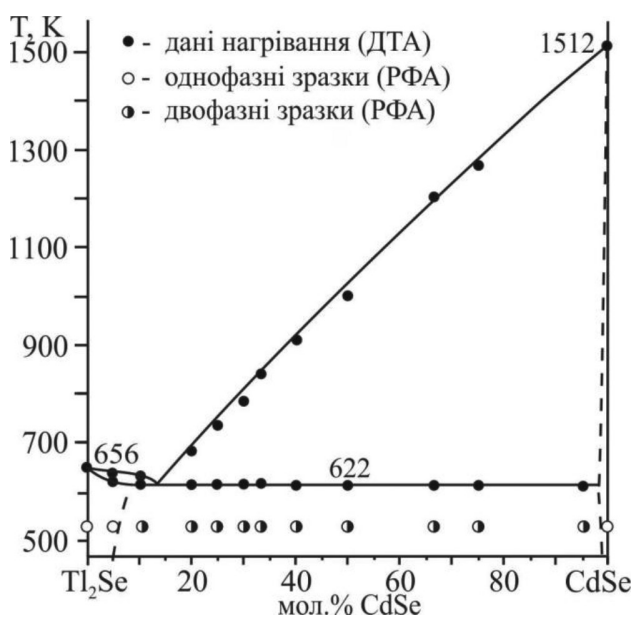


Рис. 3. Діаграма стану системи $Tl_2Se-CdSe$ (Селезень, 2024)

Діаграму стану системи $Tl_2Se-CdSe$ зображено на рис. 3.

Сплав складу 5 мол.% $CdSe$ є однофазним, тоді як сплав складу 95 мол.% $CdSe$ уже двофазним, хоча відбувається незначне зміщення дифракційних відбиттів в обох випадках. Протяжності граничних твердих розчинів при температурі гомогенізуючого відпалу (570 К) не перевищують 7 та ~3 мол.% відповідно. Встановлено приналежність взаємодії у цій системі до V типу діаграм стану за Розебомом – евтектичного ($L_e \leftrightarrow \alpha + \beta$), як і в роботі (Guseinov, 1981). Криві первинної кристалізації вихідних компонентів перетинаються в евтектичній точці з координатами 13 мол.% $CdSe$ при 622 К.

При дослідженні квазіпотрійної системи $Tl_2Se-HgSe-GeSe_2$ при 520 К авторами роботи (Mozolyuk&Piskach, 2013) було виявлено також дві тетрарні сполуки $Tl_2HgGeSe_4$ та $Tl_2HgGe_2Se_6$. Однак, після отримання нами сполук $Tl_2CdSi_3Se_8$ та $Tl_2CdGe_3Se_8$ (Selezen, 2020) і розшифровки їх структури, склад $Tl_2HgGe_2Se_6$ був уточнений до формули $Tl_2HgSi_3Se_8$, що аналогічно до кадмієвмісної системи. Уточнено діаграму стану $Tl_2Se-HgSe$ (рис. 4) порівняно з (Asadov, 1982).

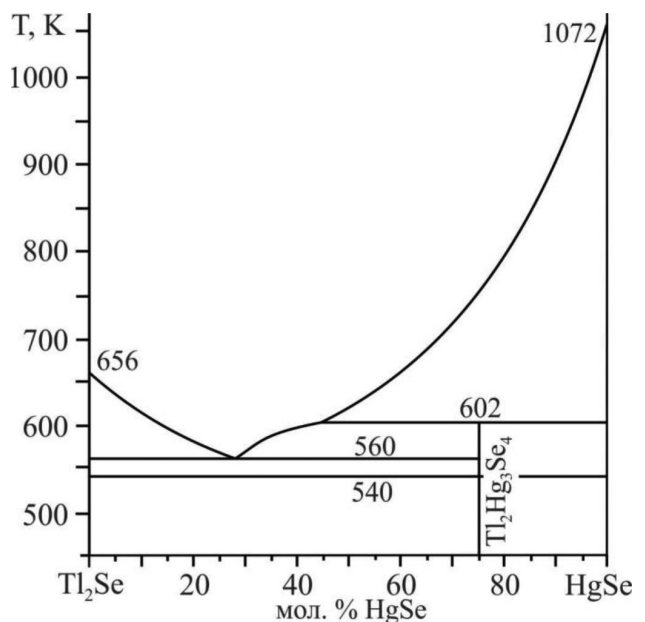


Рис. 4. Діаграма стану системи $Tl_2Se-HgSe$ (Mozolyuk, 2013)

Підтверджено інконгруентний характер утворення тернарної сполуки $Tl_2Hg_3Se_4$, що наведена в (Mozolyuk&Piskach, 2013) (моноклінна структура, ПГ $C2/c$ (Johnsen, 2011), однак отримані температури є значно нижчими від наведених

у (Asadov, 1982): 602 K – температура перитектичного утворення за реакцією $Lp + \text{HgSe} \Leftrightarrow \beta\text{-Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4$ та 540 K – поліморфного перетворення $\text{BTM-Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4 \Leftrightarrow \text{HTM-Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4$; евтектична взаємодія $\text{Le} \Leftrightarrow \alpha\text{-Ti}_2\text{Se} + \text{Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4$ відбувається при 28 мол.% HgSe і 560 K (рис. 4). При 520 K концентраційний трикутник меркурієвмісної системи (рис. 5) містить десять однофазних полів твердих розчинів на основі Ti_2Se , HgSe, GeSe_2 , Ti_4GeSe_4 , Ti_2GeSe_3 , $\text{Ti}_2\text{CdGe}_3\text{Se}_8$ та сполук: $\text{Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4$, Hg_2GeSe_4 , $\text{Ti}_2\text{CdGeSe}_4$.

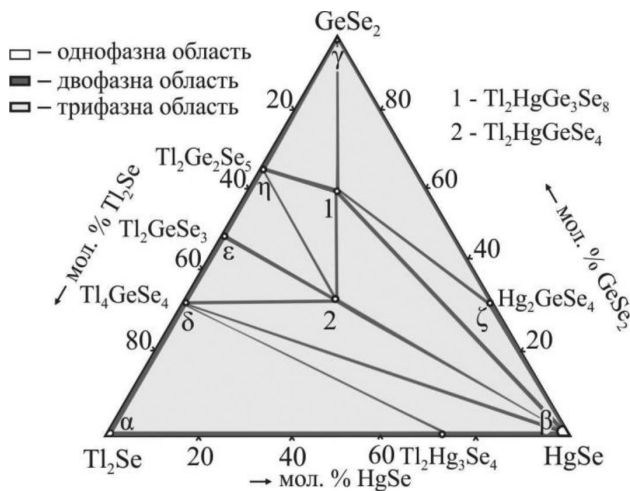


Рис. 5. Ізотермічний переріз системи $\text{Ti}_2\text{Se-HgSe-GeSe}_2$ при 570 K

Між ними є 19 двофазних рівноваг. Вони обмежують десять полів спільної кристалізації трьох фаз: $\alpha\text{-Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4\text{-}\delta$, $\delta\text{-Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4\text{-}\beta$, $\delta\text{-}\beta\text{-Ti}_2\text{HgGeSe}_4$, $\delta\text{-Ti}_2\text{HgGeSe}_4\text{-}\epsilon$, $\epsilon\text{-Ti}_2\text{HgGeSe}_4\text{-}\eta$, $\eta\text{-Ti}_2\text{HgGeSe}_4\text{-Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8$, $\text{Ti}_2\text{Hg}_3\text{Se}_4\text{-Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8\text{-}\gamma$, $\gamma\text{-Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8\text{-Hg}_2\text{GeSe}_4$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8\text{-}\beta\text{-Hg}_2\text{GeSe}_4$, $\text{Ti}_2\text{HgGe}_3\text{Se}_8\text{-Ti}_2\text{HgGeSe}_4\text{-}\beta$. Розчинність на основі сполук в цій системі незначна – до 5 мол.%. Тетрарна сполука $\text{Ti}_2\text{HgGeSe}_4$ плавиться конгруентно при 762–764 K (Johnsen, 2011; Mozolyuk&Piskach, 2013; Мозолюк, 2013).

При вивченні взаємодії в квазіпотрійній системі $\text{Ti}_2\text{Se-ZnSe-GeSe}_2$ також не виявлено відомостей про переріз $\text{Ti}_2\text{Se-ZnSe}$. Методами РФА, МСА та ДТА було проведено експериментальне дослідження фазових рівноваг у цій системі. Результати РФА при 570 K зображено на рис. 6. При зазначеній температурі у квазіподвійній системі $\text{Ti}_2\text{Se-ZnSe}$ в межах складів 0–8 мол.% ZnSe присутні α -тверді розчини на основі сполуки Ti_2Se ; далі починає кристалізуватися

суміш фаз, що складається з α - та β -твердих розчинів на основі подвійних сполук Ti_2Se та ZnSe відповідно. При складі 97 мол.% ZnSe починає кристалізується β -твердий розчин на основі подвійної сполуки ZnSe . За результатами ДТА побудовано діаграму стану подвійного перерізу $\text{Ti}_2\text{Se-ZnSe}$ (рис. 6) (Селезень, 2023).

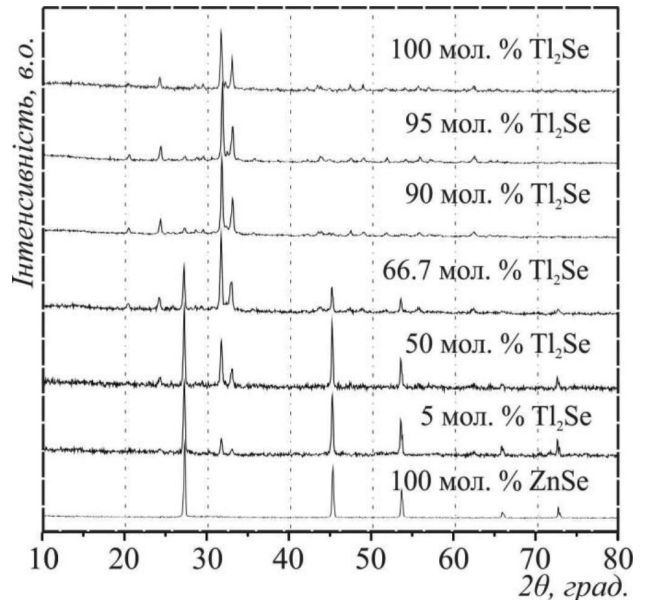


Рис. 6. Дифрактограми зразків системи $\text{Ti}_2\text{Se-ZnSe}$ (Селезень, 2023)

Встановлено, що характер фізико-хімічної взаємодії на перерізі $\text{Ti}_2\text{Se-ZnSe}$ (рис. 7) відноситься до перитектичного типу і описується рівнянням $L_p + \beta \Leftrightarrow \alpha$ при 710 K; концентраційні

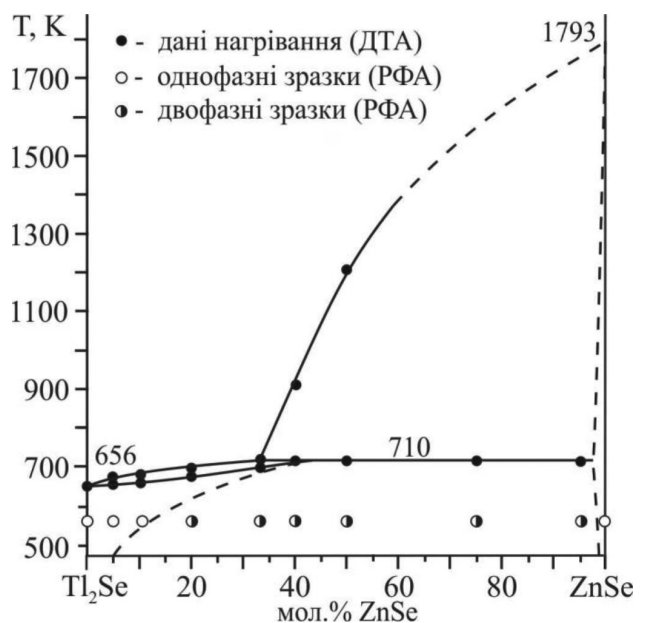


Рис. 7. Діаграма стану системи $\text{Ti}_2\text{Se-ZnSe}$ (Селезень, 2023)

5. Pielmeier F, Landolt G, Slomski B., Muff S., Berwanger J., Eich A., Khajetoorians A., Wiebe J., Aliev Z., Babanly M., Wiesendanger R., Osterwalder J., Chulkov E., Giessibl F., Dil J. Response of the topological surface state to surface disorder in TlBiSe₂. 2015. *New J. Phys.* 17. P. 023067. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/2/023067>
6. Рибалка І., Тупіцина І., Гриньов Б., Вовк Р., Кислиця М., Хаджай Г., Бойко Г. Можливість отримання кристалів ZnSe з високою структурною досконалістю для кріогенної болометричної техніки. *Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна, серія «Фізика»*. 2019. 30(1). С. 24–29. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2019-30-03>
7. Lonchakov A., Bobin S. Large linear magnetoresistance in single HgSe crystals induced by low-concentration Co impurity. *Appl. Phys. Lett.* 2021. 118(6). P. 062106. <https://doi.org/10.1063/5.0032572>
8. Moroz M., Demchenko P., Tesfaye F., Prokhorenko M., Mysina O., Soliak L., Yarema N., Prokhorenko S., Reshetnyak O. Thermodynamic properties of selected compounds of the Ag–In–Se system determined by the electromotive force method. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2022. 23(3), 575–581. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.3.575-581>
9. Cirignano M., Roshan H., Farinini E., Di Giacomo A., Fiorito S., Piccinotti D., Khabbazabkenar S., Di Stasio F., Moreels I. Blue CdSe/CdS core/crown nanoplatelet light-emitting diodes obtained via a design-of-experiments approach, *Nanoscale*. 2025. 17(1). P. 304–313. <https://doi.org/10.1039/D4NR03461A>
10. Mozolyuk M., Piskach L., Fedorchuk A., Olekseyuk I., Parasyuk O. The Tl₂Se–HgSe–GeSe₂ system and the crystal structure of Tl₂HgGeSe₄. *Chem. Met. Alloys*. 2013. 6. P. 55–62. <https://doi.org/10.30970/cma6.0229>
11. Parasyuk O., Olekseyuk I., Piskach L. X-ray powder diffraction refinement of Cu₂ZnGeTe₄ structure and phase diagram of the Cu₂GeTe₃–ZnTe system. *J. Alloys Comp.* 2005. 397(1–2). 169–172. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.01.032>
12. Piskach L., Parasyuk O., Romanyuk Y. The Phase Equilibria in the Quasi-binary Cu₂GeS₃/Se₃–CdS/Se/ Systems. *J. Alloys Comp.* 2000. 299 (1–2). P 227–231.
13. Parasyuk O., Gulay L., Romanyuk Y., Piskach L., Phase diagram of the Cu₂GeSe₃–ZnSe system and crystal structure of the Cu₂ZnGeSe₄ compound. *J. Alloys Comp.* 2001. 329(1–2). P. 202–207.
14. Romanyuk Y., Parasyuk O. Phase equilibria in the quasi-ternary Cu₂Se–ZnSe–GeSe₂ system. *J. Alloys Comp.* 2003. 348(1–2). P. 195–202. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)00852-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00852-6)
15. Olekseyuk I., Marchuk O., Gulay L., Zhabankov O. Isothermal section of the Cu₂Se–HgSe–GeSe₂ system at 670 K and crystal structures of the Compounds Cu₂HgGeSe₄ and HT-modification of Cu₂HgGeSe₄. *ChemInform*. 2005. 36(40). <https://doi.org/10.1002/chin.200540006>
16. Marchuk O., Olekseyuk I., Grebenyuk A. Phase equilibrium in the system Cu₂Se–HgSe–GeSe₂. *J. Alloys Comp.* 2008. 398(1–2). P. 80–84.
17. Piskach L., Parasyuk O. The Ag₂GeS₃ – CdS system. *Polish. J. Chem.* 1998. 72(6). P. 1112–1115.
18. Moroz M., Demchenko P., Prokhorenko M., Reshetnyak O. Thermodynamic Properties of Saturated Solid Solutions of the Phases Ag₂PbGeS₄, Ag_{0.5}Pb_{1.75}GeS₄ and Ag_{6.72}Pb_{0.16}Ge_{0.84}S_{5.20} of the Ag–Pb–Ge–S System Determined by EMF Method. *J. Phase Equilib. Diffus.* 2017. 38. 426–433. <https://doi.org/10.1007/s11669-017-0563-6>
19. Parasyuk O., Gulay L., Romanyuk Y., Olekseyuk I., Piskach L. The Ag₂Se–HgSe–GeSe₂ system and crystal structures of the compounds. *J. Alloys Comp.* 2003. 351(1–2). P. 135–144. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)01023-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)01023-X)
20. Selezen A., Olekseyuk I., Myronchuk G., Smityukh O., Piskach L. Synthesis and structure of the new semiconductor compounds Tl₂B^{II}D^{IV}X₄ (B^{II}–Cd, Hg; D^{IV}–Si, Ge; X–Se, Te) and isothermal sections of the Tl₂Se–CdSe–Ge(Sn)Se₂ systems at 570 K. *J. Solid State Chem.* 2020. 289. P. 121422. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2020.121422>
21. Олексеюк І., Селезень А., Смітюх О., Гулай Л., Піскач Л. Тетрарні халькогеніди систем Tl₂X–B^{II}X–D^{IV}X₂ (B^{II} – Cd, Hg, D^{IV} – Si, Ge; X – Se, Te). *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2021. 2. С. 26–37. <https://doi.org/10.32782/pcsd-2021-2-5>
22. Селезень А. Фазові рівноваги в системах Tl₂Se–CdSe–Si(Ge, Sn)Se₂ та споріднених, кристалічна структура і властивості проміжних фаз : дис. ... докт. філос.: 102–Хімія. Луцьк, 2024. 176 с.
23. Guseinov F. H., Babanly M. B., Kuliev A. A. Phase equilibria and intermolecular interaction in the TlSe. (Tl₂Se)–CdSe systems. *Inorg. Chem.* 1981. 26(1). 215–217.
24. Mucha I., Wiglus K. Phase studies on the quasi-binary thallium(I) selenide–cadmium selenide system. *Thermochimica Acta*. 2011. 526(1). P. 107–110.
25. Mozolyuk M., Piskach L., Fedorchuk A., Olekseyuk I., Parasyuk O. The Tl₂Se–HgSe–GeSe₂ system and the crystal structure of Tl₂HgGeSe₄. *Chem. Met. Alloys*. 2013. 6. P. 55–62. <https://doi.org/10.30970/cma6.0229>
26. Selezen A., Kogut Y., Piskach L., Gulay L. New Quaternary Chalcogenides Tl₂M^{II}M^{IV}₃Se₈ and Tl₂M^{II}M^{IV}₄X₄. *MPDI: Proceedings*. 2020. 62(1). 3. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020062003>
27. Asadov M., Babanly M., Kuliev A. (1982). Phase equilibria and thermodynamic properties of the Hg–Tl–Se system. *J. Inorg. Chem.* 27. P. 3173–3178.
28. Johnsen S., Peter S., Nguyen S., Song J., Jin H., Freeman A., Kanatzidis M. (2011). Tl₂Hg₃Q₄ (Q = S, Se, and Te): High-Density, Wide-Band-Gap Semiconductors. *Chem. Mater.* 23. P. 4375–4383.

29. Мозолук М. Фазові рівноваги та властивості фаз у системах $Tl_2X-B^{II}X-D^{IV}X_2$ і $TlC^{III}X_2-D^{IV}X_2$ (B^{II} – Hg, Pb; C^{III} – Ga, In; D^{IV} – Si, Ge, Sn; X – S, Se) : дис. ... канд. хім. наук: 02.00.01. Ужгород, 2013. 250 с.
30. Селезень А., Піскач Л. Фізико-хімічна взаємодія в системах $Tl_2Se-Zn(Cd)Se$. VII Всеукраїнська наукова конференція «Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи». Житомир, 19 квітня 2023. С. 137–138.
31. Філеп М., Сабов М. Квазіпотрійна система $Tl_2S-Tl_2Se-Tl_4PbSe_3$. *Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Серія Хімія*. 2017. 1(37). 14–16.

REFERENCES:

1. Massalski, T., Okamoto, H., Subramanian, P., & Kacprzak, L. (1990). Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd Edition. *ASM International, Materials Park, OH, USA*. 1–3. 3542.
2. Kovách, S., Nemcsics, Á., Lábadi, Z., & Motrya, S. (2003). Investigation of the Electronic Structure of Cd_4GeSe_6 by Photoelectrochemical and Photoluminescence Methods. *Inorganic Materials*. 39(2). P. 108–112.
3. McGuire, M., Scheidemann, Th., Badding, J., & DiSalvo, F. (2005). Tl_2AXTe_4 (A = Cd, Hg, Mn; X = Ge, Sn): Crystal Structure, and Thermoelectric Properties. *Chem. Mater* 17. P. 6186–6191.
4. Vasilyev, V., Minaev, V., & Batyunya, L. (2013). Thermodynamic properties, phase diagrams and glass-formation of thallium chalcogenides. *Chalcogenide Letters*. 10(11). P. 485–507.
5. Pielmeier, F., Landolt, G., Slomski, B., Muff, S., Berwanger, J., Eich, A., Khajetoorians, A., Wiebe, J., Aliev, Z., Babanly, M., Wiesendanger, R., Osterwalder, J., Chulkov, E., Giessibl, F., & Dil, J. (2015). Response of the topological surface state to surface disorder in $TlBiSe_2$. *New J. Phys.* 17. P. 023067. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/2/023067>
6. Rybalka, I., Tupitsyna, I., Hrynov, B., Vovk, R., Kyslytsia, M., Khadzai, H., & Boiko, H. (2019). Mozhlyvist otrymannia krystaliv ZnSe z vysokoju strukturnoiu doskonalistiu dlia kriohennoi bolometrychnoi tekhniki [Possibility of obtaining ZnSe crystals with high structural perfection for cryogenic bolometric techniques]. *Visnyk KhNU imeni V.N. Karazina. Seriya Fizyka – Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Physics*. 30(1). P. 24–29. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/2222-5617-2019-30-03>
7. Lonchakov, A., & Bobin, S. (2021). Large linear magnetoresistance in single HgSe crystals induced by low-concentration Co impurity. *Appl. Phys. Lett.* 118(6). P. 062106. <https://doi.org/10.1063/5.0032572>
8. Moroz, M., Demchenko, P., Tesfaye, F., Prokhorenko, M., Mysina, O., Soliak, L., Yarema, N., Prokhorenko, S., & Reshetnyak, O. (2022). Thermodynamic properties of selected compounds of the Ag–In–Se system determined by the electromotive force method. *Physics and Chemistry of Solid State*. 23(3), P. 575–581. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.3.575-581>
9. Cirignano, M., Roshan, H., Farinini, E., Di Giacomo, A., Fiorito, S., Piccinotti, D., Khabbazabkenar, S., Di Stasio, F., & Moreels, I. (2025). Blue CdSe/CdS core/crown nanoplatelet light-emitting diodes obtained via a design-of-experiments approach, *Nanoscale*. 17(1). P. 304–313. <https://doi.org/10.1039/D4NR03461A>
10. Mozolyuk, M., Piskach, L., Fedorchuk, A., Oleksyuk, I., & Parasyuk, O. (2013). The $Tl_2Se-HgSe-GeSe_2$ system and the crystal structure of $Tl_2HgGeSe_4$. *Chem. Met. Alloys*. 6. P. 55–62. <https://doi.org/10.30970/cma6.0229>
11. Parasyuk, O., Oleksyuk, I., & Piskach, L. (2005). X-ray powder diffraction refinement of $Cu_2ZnGeTe_4$ structure and phase diagram of the Cu_2GeTe_3-ZnTe system. *J. Alloys Comp.* 397(1–2). 169–172. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.01.032>
12. Piskach, L., Parasyuk, O., & Romanyuk, Y. (2000). The Phase Equilibria in the Quasi-binary $Cu_2GeS_3/Se_3-CdS/Se$ Systems. *J. Alloys Comp.* 2000. 299 (1–2). P. 227–231.
13. Parasyuk, O., Gulay, L., Romanyuk, Y., & Piskach, L. (2001). Phase diagram of the Cu_2GeSe_3-ZnSe system and crystal structure of the $Cu_2ZnGeSe_4$ compound. *J. Alloys Comp.* 2001. 329(1–2). P. 202–207.
14. Romanyuk, Y., & Parasyuk, O. (2003). Phase equilibria in the quasi-ternary $Cu_2Se-ZnSe-GeSe_2$ system. *J. Alloys Comp.* 348(1–2). P. 195–202. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)00852-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00852-6)
15. Oleksyuk, I., Marchuk, O., Gulay, L., & Zbankov, O. (2005). Isothermal section of the $Cu_2Se-HgSe-GeSe_2$ system at 670 K and crystal structures of the Compounds $Cu_2HgGeSe_4$ and HT-modification of Cu_2HgGeS_4 . *ChemInform*. 36(40). <https://doi.org/10.1002/chin.200540006>
16. Marchuk, O., Oleksyuk, I., & Grebenyuk, A. (2008). Phase equilibrium in the system $Cu_2Se-HgSe-GeSe_2$. *J. Alloys Comp.* 398(1–2). P. 80–84.
17. Piskach, L., & Parasyuk, O. (1998). The Ag_2GeS_3-CdS system. *Polish. J. Chem.* 72(6). P. 1112–1115.
18. Moroz, M., Demchenko, P., Prokhorenko, M., & Reshetnyak, O. (2017). Thermodynamic Properties of Saturated Solid Solutions of the Phases Ag_2PbGeS_4 , $Ag_{0.5}Pb_{1.75}GeS_4$ and $Ag_{6.72}Pb_{0.16}Ge_{0.84}S_{5.20}$ of the Ag-Pb-Ge-S System Determined by EMF Method. *J. Phase Equilib. Diffus.* 38. P. 426–433. <https://doi.org/10.1007/s11669-017-0563-6>
19. Parasyuk, O., Gulay, L., Romanyuk, Y., Oleksyuk, I., & Piskach, L. (2003). The $Ag_2Se-HgSe-GeSe_2$ system and crystal structures of the compounds. *J. Alloys Comp.* 351(1–2). P. 135–144. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)01023-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)01023-X)

20. Selezen, A., Olekseyuk, I., Myronchuk, G., Smitiukh, O., & Piskach, L. (2020). Synthesis and structure of the new semiconductor compounds $Tl_2B^{II}D^{IV}X_4$ (B^{II} – Cd, Hg; D^{IV} – Si, Ge; X – Se, Te) and isothermal sections of the Tl_2Se –CdSe–Ge(Sn)Se₂ systems at 570 K. *J. Solid State Chem.* 289. P. 121422. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2020.121422>
21. Olekseyuk, I., Selezen, A., Smitiukh, O., Gulay, L., & Piskach, L. (2021). Tetrarni zhalkohenidy system $Tl_2X-B^{II}X-D^{IV}X_2$ (B^{II} – Cd, Hg, D^{IV} – Si, Ge; X – Se, Te) [Quaternary chalcogenides of the $Tl_2X-B^{II}X-D^{IV}X_2$ (B^{II} – Cd, Hg, D^{IV} – Si, Ge; X – Se, Te) systems]. *Problemy khimii ta stalogo rozvytku – Problems of Chemistry and Sustainable Development*. 2. P. 2637. <https://doi.org/10.32782/pcsd-2021-2-5> [in Ukrainian].
22. Selezen, A. (2024). Fazovi rivnovahy v systemakh Tl_2Se –CdSe–Si(Ge, Sn)Se₂ ta sporidnenykh, krystalichna struktura i vlastymosti promizhnykh faz : dys. ... doct. filos.: 102–Khimiya [Phase equilibria in the quasi-ternary Tl_2Se –CdSe–Si(Ge, Sn)Se and related systems, crystal structure and properties of intermediate phases : thesis ... philos. doc.: 102– Chemistry]. Lutsk. 176 [in Ukrainian].
23. Guseinov, F., Babanly, M., & Kuliev, A. (1981). Phase equilibria and intermolecular inreraction in the $TlSe$. (Tl_2Se)–CdSe systems. *Inorg. Chem.*, 26(1). P. 215–217.
24. Mucha, I., & Wiglusz, K. (2011). Phase studies on the quasi-binary thallium(I) selenide–cadmium selenide system. *Thermochimica Acta*. 526(1). P. 107–110.
25. Mozolyuk, M., Piskach, L., Fedorchuk, A., Olekseyuk, I., & Parasyuk, O. (2013). The Tl_2Se –HgSe–GeSe₂ system and the crystal structure of $Tl_2HgGeSe_4$. *Chem. Met. Alloys*. 6. P. 55–62. <https://doi.org/10.30970/cma6.0229>
26. Selezen, A., Kogut, Y., Piskach, L., & Gulay, L. (2020). New Quaternary Chalcogenides $Tl_2M^{II}M^{IV}Se_8$ and $Tl_2M^{II}M^{IV}X_4$. *MPDI: Proceedings*. 62(1). P. 3. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020062003>
27. Asadov, M., Babanly, M., & Kuliev, A. (1982). Phase equilibria and thermodynamic properties of the Hg–Tl–Se system. *Inorg. Chem.* 27, P. 3173–3178.
28. Johnsen, S., Peter, S., Nguyen, S., Song, J., Jin, H., Freeman, A., & Kanatzidis, M. (2011). $Tl_2Hg_3Q_4$ (Q = S, Se, and Te): High-Density, Wide-Band-Gap Semiconductors. *Chem. Mater.* 23. P. 4375–4383.
29. Mozolyuk, M. (2013). Fasovi rivnovahy ta vlastyvoli faz u systemakh $Tl_2X-B^{II}X-D^{IV}X_2$ i $TlC^{III}X_2-D^{IV}X_2$ (B^{II} – Hg, Pb; C^{III} – Ga, In; D^{IV} – Si, Ge, Sn; X – S, Se) : dys. ... kand. khim. nauk: 02.00.01 [Phase equilibria and properties of phases in the $Tl_2X-B^{II}X-D^{IV}X_2$ i $TlC^{III}X_2-D^{IV}X_2$ (B^{II} – Hg, Pb; C^{III} – Ga, In; D^{IV} – Si, Ge, Sn; X – S, Se systems) : thesis ... Cand. of Chem. Sci.: 02.00.01]. Uzhhorod. 250 s. [in Ukrainian].
30. Selezen, A., & Piskach, L. (2023). Fyzyko-khimichna vzayemodiya v systemakh Tl_2Se –Zn(Cd)Se. VII Vseukrayinska naukova konferenciya «Aktualni zadachi khimii: doslidzhennya ta perspektyvy». Zhytomyr, 19 kvitnya 2023. [Physico-chemical interactions in the Tl_2Se –Zn(Cd)Se systems. VII all-Ukrainian scientific conference «Actual problems of chemistry: research and prospects». Zhytomyr, April 19, 2023]. S. 137–138. [in Ukrainian].
31. Filep, M., & Sabov, M. (2017). Kvasipotriyna systema Tl_2S – Tl_2Se – Tl_4PbSe_3 [Quasiternary Tl_2S – Tl_2Se – Tl_4PbSe_3 system]. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series Chemistry*. 1(37). S. 14–16. [in Ukrainian].

УДК 548.736.4

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-7>**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**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., Павлюк, В. (2025). Фазові рівноваги у почетвірній системі La-Li-Ni-Ge за температури 400 °С. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 50–57, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-7>

ФАЗОВІ РІВНОВАГИ У ПОЧЕТВІРНІЙ СИСТЕМІ La-Li-Ni-Ge ЗА ТЕМПЕРАТУРИ 400 °С

У роботі за допомогою рентгенівського X-променевого, фазового і структурного аналізів та енергодисперсійної X-променевої спектроскопії проведено вивчення взаємодії компонентів у системі La-Li-Ni-Ge в області LaGeLiGeNiGeGe.

Сплави отримували шляхом плавлення стехіометричних кількостей складових елементів, після чого відпалювали при температурі 400 °С на протязі 480 годин. 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 FullPro.

Для експериментального визначення кількості Літію було використано метод полуменевої фотометрії. Для встановлення фазового складу цілого ряду отриманих зразків почетвірної системи використано метод енергодисперсивної рентгенівської спектроскопії (EDX).

У експериментально дослідженій ділянці вперше виявлено, що на перерізі між потрійними сполуками LaLiGe_2 та LaNiGe_2 спостерігаються обмежені тверді розчини заміщення складів $\text{LaLi}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Ge}_2$ ($x = 0-0.31$) (структурний тип CeNiSi_2 , символ Пірсона oS16, просторова група Cmcm , $a = 0.4307-0.4309$; $b = 1.6905-1.6919$; $c = 0.4237-0.4239$ нм) та $\text{LaLi}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Ge}_2$ ($x = 0-0.32$) (структурний тип CaLiSi_2 , символ Пірсона oP16, просторова група Pnma , $a = 0.7851-0.7836$; $b = 0.4010-0.3997$; $c = 1.0884-1.0866$ нм). На основі тернарної фази La_2LiGe_6 встановлено мінімальну розчинність Нікелю і відповідно утворення при цьому твердого розчину складу $\text{La}_2\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_x\text{Ge}_6$ ($x = 0-0.24$) (структурний тип Pr_2LiGe_6 , символ Пірсона oS18, просторова група Cmcm , $a = 0.4187-0.4185$; $b = 2.1113-2.1110$; $c = 0.4391-0.4390$ нм).

Межі виявлених твердих розчинів було встановлено за графіками зміни об'єму елементарних комірок при заміщенні Літію на Нікель і навпаки. Підтверджено існування п'яти тернарних сполук (LaNiGe_2 , LaNiGe_3 , $\text{LaNi}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}$, LaLiGe_2 , La_2LiGe_6). Тернарні сполуки точкового складу у в області проведеного експерименту не утворюються.

Ключові слова: Лантан, Літій, Нікель, Германій, фазові рівноваги, синтез, структура, 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

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., Pavlyuk, V. (2024). Phazovi rivnovagi v pochetvirmij systemi La-Li-Ni-Ge za temperaturi 400 °C [Phase equilibria in the quaternary system La-Li-Ni-Ge at a temperature of 400 °C]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 50–57, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-7>

PHASE EQUILIBRIA IN THE QUATERNARY SYSTEM LA-LI-NI-GE AT A TEMPERATURE OF 400 °C

In the work, using X-ray, phase and structural analyses and energy dispersion X-ray spectroscopy, the interaction of components in the La-Li-Ni-Ge system in the LaGe-LiGe-NiGe-Ge region was studied.

The alloys were obtained by melting stoichiometric amounts of constituent elements and then annealing at 400 °C for 480 hours. 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 FullPro program.

For experimental determination of the amount of Lithium used the method of flame photometry. o confirm the phase composition of a number of the obtained system samples, the method of energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) was used.

In the experimentally studied area, for the first time, it was found that on the section between the triple compounds of LaLiGe₂ and LaNiGe₂, there are limited solid solutions of substitution of LaLi_{1-x}Ni_xGe₂ compounds (x = 0–0.31) (structural type SeNiSi₂, Pearson symbol oS16, space group Cmc21, a = 0.4307–0.4309; b = 1.6905–1.6919; c = 0.4237–0.4239 nm) and LaLi_{1-x}Ni_xGe₂ (x = 0–0.32) (structural type CaLiSi₂, Pearson symbol oP16, space group Pnma, a = 0.7851–0.7836; b = 0.4010–0.3997; c = 1.0884–1.0866 nm). Based on the ternary phase of the La₂LiGe₆, the minimum solubility of Nickel was established and, accordingly, the formation of a solid solution of the composition of La₂Li_{1-x}Ni_xGe₆ (x = 0–0.24) (structural type Pr₂LiGe₆, Pearson symbol oS18, space group Cmmm, a = 0.4187–0.4185; b = 2.1113–2.1110; c = 0.4391–0.4390 nm).

The boundaries of the detected solid solutions were established according to the graphs of the change in the volume of elementary cells when replacing Lithium with Nickel and vice versa. The existence of five ternary compounds (LaNiGe₂, LaNiGe₃, LaNi_{0.5}Ge_{1.5}, LaLiGe₂, La₂LiGe₆) is confirmed. Quaternary compounds of point composition are not formed in the region of the experiment.

Key words: Lanthanum, Lithium, Nickel, Germanium, phase equilibria, synthesis, structure, solid solution.

Актуальність проблеми. Інтерметаліди, зокрема сполуки, що містять рідкісноземельні (РЗМ, R), d-метали (Mn, Fe, Co, Ni) та p-елементи IVA групи періодичної системи, привертають особливу увагу, що пояснюється наявністю в них цікавих ефектів і властивостей (важкі ферміони, Кондо-системи, співіснування магнетизму та надпровідності) (Laffargue, 1999; Schobinger Papamantellos, 2001; Mudryk, 2001).

Такі сполуки цікаві не тільки з точки зору теорії фундаментального магнетизму, а й як стартовий матеріал для високоякісних постійних магнітів. Інтерметаліди широко застосовують у водневій енергетиці, а різноманітні фази на основі рідкісноземельних металів та Нікелю проявляють цікаві магнітні, каталітичні, гідрогенсорбційні та електрохімічні властивості і є перспективними для використання у ролі накопичувачів водню та електродних матеріалів у металогідридних акумуляторах.

Сучасні літературні дані вказують на певну кількість сполук Силіцію, Германію та Стануму з лужними та рідкісноземельними металами (Павлюк, 1993; Матвіїшин, 2009). Дані елементи – напівпровідникові елементарні речовини. Для напівпровідникової техніки представляють найбільший інтерес тверді розчини заміщення на основі Германію і Силіцію. Завдяки електронній будові Силіцій, крім того, використовується для виготовлення сонячних батарей і входить до складу жароміцних і кислотоотривких сплавів.

Германій застосовують у радіоелектроніці й електротехніці як напівпровідник, в ядерній техніці, приладобудуванні, машинобудуванні й металургії. Кристалічний Германій є надзвичайно важливим напівпровідниковим матеріалом із шириною забороненої зони 0,66 еВ. Велику частину сплавів Стануму використовують для виготовлення підшипників, фольги,

бронзи, проводів. Крім того, цей метал широко використовують для нанесення антикорозійного покриття на залізні вироби.

Однак, незважаючи на вищенаведені факти, почетвірні системи, до складу яких входять рідкісноземельні метали, Літій, перехідні метали та елементи IVA групи не досліджувалися на предмет утворення сполук, і, відповідно, їх фізико-хімічних властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фазові рівноваги тернарної системи La-Li-Ge було представлено в роботі (Pavlyuk, 2013) і ґрунтуються на дослідженні 77 зразків, відпалених при 400 °С, методами рентгенівського аналізу та електронної мікроскопії. При вивченні системи в області концентрацій від 30 до 100 атомних відсотків Ge, було підтверджено існування наступних тернарних сполук і уточнені їх кристалографічні параметри: La_2LiGe_6 (*Cmmm*, структурний тип Pr_2LiGe_6), LaLiGe_2 (*Pnma*, структурний тип CaLiSi_2), $\text{La}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$ (*Cmcm*, структурний тип $\text{Ce}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$), $\text{Li}_8\text{La}_7\text{Ge}_{10}$ (*Cmmm*, новий структурний тип), $\text{La}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$

(*Immm*, структурний тип $\text{Ce}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$), $\text{La}_3\text{Li}_4\text{Ge}_4$ (*Immm*, структурний тип $\text{Gd}_3\text{Cu}_4\text{Ge}_4$) і La_4LiGe_4 (*Pnma*, структурний тип Tm_4LiGe_4).

У цій системі встановлено утворення твердого розчину включення складу $\text{La}_5\text{Li}_x\text{Ge}_3$, який кристалізується за рахунок часткового включення (до $x = 0.5$) атомів Літію в порожнини подвійної фази La_5Ge_3 .

Область незмішування Літію та Лантану простягається у потрійну систему до 20 ат.% Ge, що досить добре узгоджується із літературними даними для інших рідкісноземельних металів.

Ізотермічний переріз трикомпонентної системи La-Ni-Ge за температури 250 °С досліджували у праці (Zhuang, 2013) методами рентгенівської порошкової дифракції, термічного аналізу та скануючої електронної мікроскопії. Він складається з 27 однофазних, 59 двофазних і 33 трифазних областей. Існування восьми потрійних сполук, а саме La_8NiGe_5 , $\text{La}_{11}\text{Ni}_4\text{Ge}_6$, La_3NiGe_2 , $\text{La}_3\text{Ni}_4\text{Ge}_4$, La_2NiGe_3 , LaNiGe_2 , LaNi_2Ge_2 , $\text{La}_{15}\text{NiGe}_9$ при цій температурі було

Таблиця 1

Кристалографічні характеристики тернарних сполук систем La-Li-Ge, La-Ni-Ge та Ge-Li-Ni

Сполука	Структурний тип	Символ Пірсона	Просторова група	Параметри комірки, нм			Література
				<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
LaLiGe_2	CaLiSi_2	<i>oP16</i>	<i>Pnma</i>	0.78512	0.4010	1.0884	Pavlyuk, 2013
LaLi_2Ge	Cr_2AlC	<i>hP8</i>	$P6_3/mmc$	0.4556	0.4556	0.7759	Schuster, 1974
$\text{La}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$	$\text{Ce}_2\text{Li}_2\text{Ge}_3$	<i>oS28</i>	<i>Cmcm</i>	0.45117	1.8993	0.70243	Pavlyuk, 2013
$\text{La}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$	$\text{Ce}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$	<i>oI78</i>	<i>Immm</i>	0.45239	0.69899	5.3038	Pavlyuk, 2013; Jung, 2012
La_4LiGe_4	Tm_4LiGe_4	<i>oP36</i>	<i>Pnma</i>	0.76194	1.5521	0.81696	Pavlyuk, 2013; Fornasini 2012; Nam, 2013
$\text{La}_7\text{Li}_8\text{Ge}_{10}$	$\text{La}_7\text{Li}_8\text{Ge}_{10}$	<i>oS50</i>	<i>Cmmm</i>	0.69742	3.4018	0.45156	Pavlyuk, 2013; Fornasini 2012
$\text{La}_3\text{Li}_4\text{Ge}_4$	$\text{Gd}_3\text{Cu}_4\text{Ge}_4$	<i>oI22</i>	<i>Immm</i>	0.45117	0.69267	1.4994	Pavlyuk, 2013; Fornasini 2012
$\text{La}_3\text{Li}_x\text{Ge}_3$ ($x = 0-0.5$)	Hf_5CuSn_3	<i>hP18</i>	$P6_3/mcm$	0.895308	0.895308	0.68920	Pavlyuk, 2013
La_2LiGe_6	Pr_2LiGe_6	<i>oS18</i>	<i>Cmmm</i>	0.41871	2.11132	0.43912	Pavlyuk, 2013
LaNiGe_2	CeNiSi_2	<i>oS16</i>	<i>Cmcm</i>	0.4299	1.6879	0.4231	Zhuang, 2005; Morozkin, 1998
La_3NiGe_2	Gd_3NiSi_2	<i>oP24</i>	<i>Pnma</i>	1.2041	0.4358	1.1871	Zhuang, 2005
La_3NiGe_3	Hf_5CuSn_3	<i>hP18</i>	$P6_3/mcm$	0.8950	0.8950	0.7042	Guloy, 1993
La_8NiGe_5	La_8NiGe_5	<i>oP112</i>	<i>Pmmn</i>	1.5586	1.8384	1.1351	Zhuang, 2005
$\text{La}_{15}\text{NiGe}_9$	$\text{La}_{15}\text{FeGe}_9$	<i>hP50</i>	$P6_3/mc$	1.5500	1.5500	0.6873	Zhuang, 2005
La_2NiGe_3	AlB_2	<i>hP3</i>	$P6/mmm$	0.4195	0.4195	0.4336	Zhuang, 2005
LaNi_2Ge_2	CeAl_2Ga_2	<i>tI10</i>	$I4/mmm$	0.41848	0.41848	0.99000	Zhuang, 2005; Morozkin, 1998
$\text{La}_3\text{Ni}_4\text{Ge}_4$	$\text{U}_3\text{Ni}_4\text{Si}_4$	<i>oI22</i>	<i>Immm</i>	0.42234	0.42295	2.4156	Zhuang, 2005
$\text{La}_{11}\text{Ni}_4\text{Ge}_6$	$\text{La}_{11}\text{Ni}_4\text{Ge}_6$	<i>mS42</i>	$C12/m1$	1.8637	$\begin{matrix} 0.4384 \\ \beta = 106.13^\circ \end{matrix}$	1.4191	Zhuang, 2005
LaNi_9Ge_4	$\text{CeNi}_{8.5}\text{Si}_{4.5}$	<i>tI56</i>	$I4/mcm$	0.7987	0.7987	1.1790	Gold, 2012
LaNiGe_3	BaNiSn	<i>tI10</i>	$I4mm$	0.4403	0.4403	0.9681	Anand, 2008
Ge_6LiNi_6	Ge_6LiNi_6	<i>hP39</i>	$P6/mmm$	0.8734	$\begin{matrix} 0.8734 \\ \gamma = 120^\circ \end{matrix}$	0.7797	Buchholz, 1981

підтверджено. Максимальна розчинність Германію в Ni і LaNi_5 становить близько 12 і 16 ат. % відповідно.

У роботі (Buchholz, 1983) авторами методом монокристалу за допомогою автоматичного дифрактометру Enraf-Nonius CAD4 виявлено утворення тернарного інтерметаліду Ge_6LiNi_6 , який кристалізується у власному структурному типі.

Кристалографічні характеристики потрійних сполук, утворення яких спостерігається у вищезгаданих системах наведено в таблиці 1.

Мета нашої роботи – експериментальний аналіз взаємодії елементів і проведення фазового аналізу для тетрарної системи La-Li-Ni-Ge у розрізі LaGeLiGeNiGeGe при температурі відпау 400 °C.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для побудови діаграми стану нами було виготовлено 33 сплави. Синтез зразків виконували методом електродугового сплавляння шихти вихідних компонентів (із наступним вмістом основних компонентів: La – 99.8 %, Li – 99.6 %, Ni – 99.97 %, Ge – 99.99 %). Наважку чистих компонентів сплавляли у електродуговій печі в атмосфері очищеного аргону. У якості гетеру нами було застосовано губчастий титан. Для контролю втрат шихти під час плавлення проводили повторне зважування сплавів, причому втрати не були більшими 1.5 % для отриманих зразків.

Сплави відпалювали за температури 400 °C у вакуумованих кварцових ампулах упродовж 480 годин з подальшим гартуванням у холодній воді.

Рентгенівський фазовий аналіз проводили за допомогою автоматичних дифрактометрів URD-6 (Cu $K\alpha$ -випромінювання) та STOE STADI P (Cu $K\alpha_1$ -випромінювання) у кроковому режимі зйомки. Ідентифікували фази порівнянням дифрактограм досліджуваних зразків з теоретичними дифрактограмами чистих компонентів та сполук, що існують у відповідних подвійних і потрійних системах (програми LATCON (Schwarzenbach, 1966) та PowderCell (Kraus, 1999)).

Розрахунок та індексування дифрактограм, уточнення значень кристалічних ґраток виконували з використанням пакета програми WinCSD (Akselrud, 2014). Визначення кристалічної структури методом порошку проходило

за допомогою програми FullProf (Rodriguez-Carvajal, 1998). Якісний і кількісний склад фаз визначали за допомогою спектрального методу енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM) з рентгенівським мікроаналізатором REMMA-102-02.

На жаль, Літій досліджувати класичними рентгенівськими спектральними методами не вдається, тому вміст даного елементу у сплавах визначали за допомогою емісійної полуменевої фотометрії. Нами для робіт по уточненню складів підготованих зразків було застосовано полуменевий фотометр Carl Zeiss Flapho-4.

У полум'я пропан-повітря нами вводилися розчини проб і стандартних розчинів отриманих зразків. Із спектру емісії інтерференційним світлофільтром виділяли характерні для Літію лінії ($\lambda = 768$ нм), за інтенсивністю цих ліній встановлювали концентрацію лужного металу у пробі. У полум'ї випромінює лише частина атомів, які перейшли у збуджений стан. Інтенсивність світла, що випромінюється збудженими атомами, пропорційна до кількості атомів, які його випромінюють, а кількість атомів пропорційна до концентрації речовини у розчині. Для проведення таких експериментальних дій нами з приготованих і відпалених сплавів, які мали масу менше 0.15 г було підготовлено розчини, розчинивши зразки у 20 cm^3 хлоридної кислоти із концентрацією 1 моль на 1 dm^3 . Отримані дані вмісту Літію у досліджуваних розчинах визначали у mg/dm^3 , що дало змогу перевести в масові відсотки лужний метал у сплавах.

У результаті проведення рентгенофазового, рентгеноструктурного, металографічного аналізів, дослідження мікроструктури синтезованих зразків нами вивчено і побудовано діаграму стану системи LaLiNiGe в області LaGeLiGeNiGeGe при 400 °C, яку представлено на рис. 1 (для гіпотетичних рівноваги використано пунктир). Для уточнення меж фазових полів використано мікроструктурний та локальний рентгеноспектральний аналізи, фотографії мікрошліфів для сплавів LaNiGe_2 та $\text{LaLi}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{Ge}_2$ показано на рис. 2 (а, б).

У досліджуваній області нами підтверджено літературні дані щодо існування тернарних сполук LaNiGe_2 , LaNiGe_3 і $\text{LaNi}_{0.5}\text{Ge}_{1.5}$ із системи LaNiGe та LaLiGe_2 і La_2LiGe_6 із системи LaLiGe .

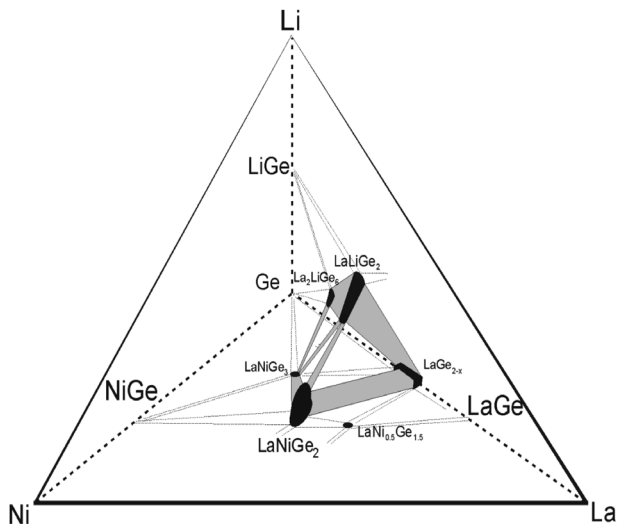
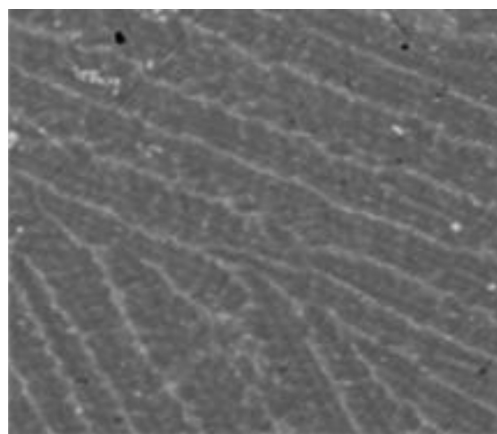
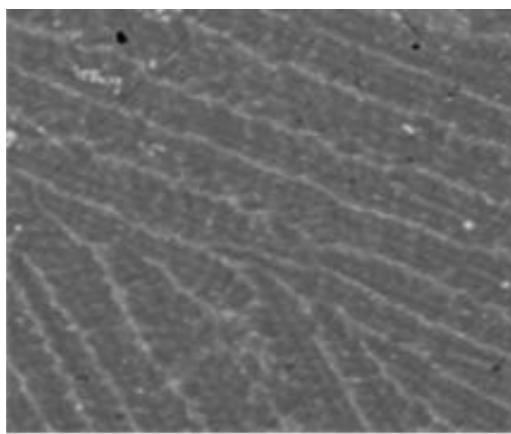


Рис. 1. Проекція діаграми стану почетвірної системи LaLiNiGe при 400 °C на сторону концентраційного тетраедра LaLiNi



a

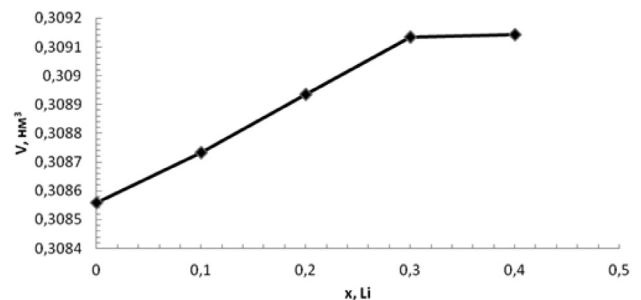


б

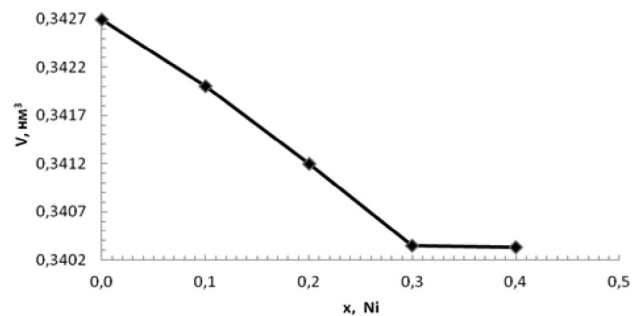
Рис. 2. Електронні мікрофотографії сплавів LaNiGe₂ (*a*) та LaLi_{0.2}Ni_{0.8}Ge₂ (*б*)

Виявлено, що LaNiGe₂ розчиняє Літій до 7.5 ат.%, а розчинність Нікелю у LaLiGe₂ є дещо вища і становить близько 7.75 ат.%. Для встановлення границь отриманих твердих розчинів було побудовано графіки змінювання об'єму елементарних ґраток (рис. 3, *a*, *б*), а область однорідності для розчину LaLi_{*x*}Ni_{1-*x*}Ge₂ підтверджена як методом порошку, так і мікροструктурно. Незначна розчинність Нікелю (близько 3 ат.%) також спостерігається у тернарній фазі La₂LiGe₆ (рис. 3, *в*). При аналізі вищезгаданих твердих розчинів спостерігається лінійний характер зміни об'єму ґраток і цей факт повністю відповідає правилу Вегарда.

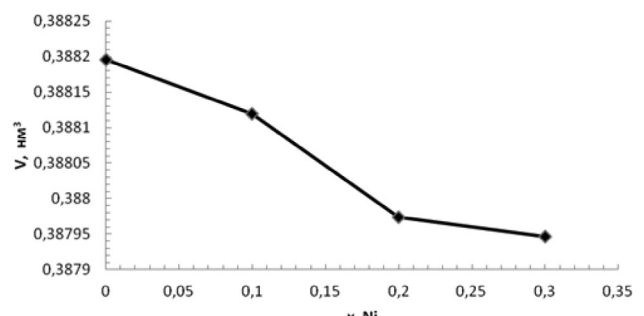
Склад сплавів, кристалічні характеристики та періоди ґратки виявлених розчинів приведені в табл. 2.



a



б



в

Рис. 3. Змінювання об'єму елементарних ґраток розчинів LaLi_{*x*}Ni_{1-*x*}Ge₂ (0 ≤ *x* ≤ 0.31) (*a*), LaLi_{1-*x*}Ni_{*x*}Ge₂ (0 ≤ *x* ≤ 0.32) (*б*) і La₂Li_{1-*x*}Ni_{*x*}Ge₆ (0 ≤ *x* ≤ 0.24) (*в*)

Таблиця 2

Протяжність та параметри елементарної комірки твердих розчинів системи La-Li-Ni-Ge

Сполука	Структурний тип	Символ Пірсона	Просторова група	Параметри ґратки, нм		
				<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
LaLi _{<i>x</i>} Ni _{1-<i>x</i>} Ge ₂ (<i>x</i> = 0–0.31)						
LaNiGe ₂	CeNiSi ₂	<i>oS16</i>	<i>Cmcm</i>	0.4307	1.6905	0.4237
LaLi _{0.1} Ni _{0.9} Ge ₂	CeNiSi ₂	<i>oS16</i>	<i>Cmcm</i>	0.4308	1.6909	0.4238
LaLi _{0.2} Ni _{0.8} Ge ₂	CeNiSi ₂	<i>oS16</i>	<i>Cmcm</i>	0.4308	1.6914	0.4239
LaLi _{0.3} Ni _{0.7} Ge ₂	CeNiSi ₂	<i>oS16</i>	<i>Cmcm</i>	0.4309	1.6919	0.4239
LaLi _{0.4} Ni _{0.6} Ge ₂	CeNiSi ₂	<i>oS16</i>	<i>Cmcm</i>	0.4309	1.6919	0.4239
LaLi _{1-<i>x</i>} Ni _{<i>x</i>} Ge ₂ (<i>x</i> = 0–0.32)						
LaLiGe ₂	CaLiSi ₂	<i>oP16</i>	<i>Pnma</i>	0.7851	0.4010	1.0884
LaLi _{0.9} Ni _{0.1} Ge ₂	CaLiSi ₂	<i>oP16</i>	<i>Pnma</i>	0.7846	0.4006	1.0881
LaLi _{0.8} Ni _{0.2} Ge ₂	CaLiSi ₂	<i>oP16</i>	<i>Pnma</i>	0.7841	0.4001	1.0876
LaLi _{0.7} Ni _{0.3} Ge ₂	CaLiSi ₂	<i>oP16</i>	<i>Pnma</i>	0.7837	0.3997	1.0868
LaLi _{0.6} Ni _{0.4} Ge ₂	CaLiSi ₂	<i>oP16</i>	<i>Pnma</i>	0.7836	0.3996	1.0866
La ₂ Li _{1-<i>x</i>} Ni _{<i>x</i>} Ge ₆ (<i>x</i> = 0–0.24)						
La ₂ LiGe ₆	Pr ₂ LiGe ₆	<i>oS18</i>	<i>Cmmm</i>	0.4187	2.1113	0.4391
La ₂ Li _{0.9} Ni _{0.1} Ge ₆	Pr ₂ LiGe ₆	<i>oS18</i>	<i>Cmmm</i>	0.4186	2.1112	0.4390
La ₂ Li _{0.8} Ni _{0.2} Ge ₆	Pr ₂ LiGe ₆	<i>oS18</i>	<i>Cmmm</i>	0.4186	2.1111	0.4390
La ₂ Li _{0.7} Ni _{0.3} Ge ₆	Pr ₂ LiGe ₆	<i>oS18</i>	<i>Cmmm</i>	0.4185	2.1110	0.4389

Висновки. За допомогою цілого ряду експериментальних методів побудовано діаграму фазових рівноваг системи LaLiNiGe в області LaGeLiGeNiGeGe за температури 400 °С. За характером взаємодії компонентів досліджувана нами система подібна до раніше вивченої LaLiNiSi (Stetskiv, 2024) і теж немає у проаналізованій області точкових почетвірних сполук. За умов експерименту виявлено існування трьох твердих розчинів заміщення наступних складів: LaLi_xNi_{1-x}Ge₂ (*x* = 0–0.31), LaLi_{1-x}Ni_xGe₂ (*x* = 0–0.32) та La₂Li_{1-x}Ni_xGe₆ (*x* = 0–0.24).

Нами було встановлено, що розширення кількості складників у експериментально вивчених системах не призводить до утворення нових тетрарних сполук, але за цих обставин спостерігається утворення твердих розчинів заміщення.

Варто зазначити, що на взаємодію компонентів у подвійних, потрійних чи

багатокомпонентних системах впливають наступні фактори:

- співвідношення атомних радіусів компонентів (розмірний фактор);
- електронна конфігурація;
- електронегативність;
- термодинамічні та інші фізико-хімічні властивості компонентів.

Таким чином, можна стверджувати, що при утворенні розчинів заміщення у системі LaLiNiGe вирішальну роль грає розмірний чинник. У ній атоми лужного металу заміщають атоми перехідного через близькість за величинами їх ефективних радіусів. Наявність двох компонентів із такими близькими розмірними характеристиками визначає взаємодію елементів у почетвірних системах і зумовлює важкість утворення у них точкових сполук.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Laffargue D., Bourée F., Chevalier B., Etourneau A., Roisnel T. Magnetic structure of the antiferromagnetic Kondo stannide Ce₂Ni₂Sn. *Phys. B*. 1999. Vol. 259/261. P. 46–47. doi:10.1016/s0921-4526(98)00734-0
2. Schobinger Papamantellos P., André G., Rodriguez Carvajal J., Buschow K. H. J., Durivault L. Magnetic ordering of CeNi_{0.78}Sn₂ and Ce₃Ni₅Sn₇ compounds by neutron diffraction. *J. Alloys Compd.* 2001. Vol. 325. P. 29–36. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01358-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01358-5)
3. Mudryk Y. S., Kaczorowski D., Romaka L. P., Bodak O. I., Grytsiv A. V., et al. Physical properties and superconductivity of skutterudite-related Yb₃Co_{4.3}Sn_{12.7} and Yb₃Co₄Ge₁₃. *J. Phys.: Condens. Matter* 2001. Vol. 12. P. 7391-7402. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/13/33/319>
4. Павлюк В. В., Бодак О. І., Кеворков Д. Г., Печарський В. К. Дослідження твердих розчинів LaLi_xCu_{2-x}Si₂ та LaLi_xCu_{2-x}Ge₂ в системах {La, Ce}-Li-Cu-{Si, Ge} при 470 К. *Доп. АН України*. 1993. № 9. С. 87–89.

5. Матвійшин Р.І. Взаємодія Ербію із перехідними металами (Co, Ni), Літієм та р-елементами IV групи (Si, Ge). *Автореф. дис. канд. хім. наук. Львів*, 2009.
6. Pavlyuk V., Stetskiy A., Rozdzyńska-Kielbik B. The isothermal section of the phase diagram of Li – La – Ge system at 400 °C. *Intermetallics*. 2013. Vol. 43, P. 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.07.002>
7. Schuster H. U., Czybulka A. Die phase Li_2CeGe . *Z. Naturforsch.* 1974. Bd. 29B. S. 9-10. <https://doi.org/10.1515/znb-1974-9-1012>
8. Jung Y., Nam G., Jeon J., Kim Y., You T.S. Crystal structure and chemical bonding of novel Li-containing polar intermetallic compound $\text{La}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$. *J. of Solid State Chemistry*. 2012. Vol. 196. P. 543-549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2012.07.034>
9. 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. Vol. 31. P. 114–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.06.011>
10. Nam G., Jeon J., Kim Y., Kang S.K., You T.S. Combined effect of chemical pressure and valence electron concentration through the electron-deficient Li substitution on the RE_4LiGe_4 (RE = La, Ce, Pr, and Sm) system. *J. of Solid State Chemistry*. 2013. Vol. 205. P. 10–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JSSC.2013.06.027>
11. Zhuang Y., Hu Z., Liu J., Lü J., Yan J. The 523 K isothermal section of La–Ni–Ge ternary system phase diagram. *J. Alloys Compd.* 2005. Vol. 387. P. 239-242. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.06.065>
12. Morozkin A. V., Seropegin Yu. D., Gribov A. V., Sviridov I. A., Kurenbaeva J. M. Analysis of the melting temperatures of RTX_2 (CeNiSi₂ structure) and RT_2X_2 (CeGa₂Al₂ structure) compounds [R = La, Ce, Sm, Er, Tm; T = Fe, Co, Ni; X = Si, Ge]. *J. Alloys Compd.* 1998. Vol. 264. P. 190–196. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(97\)00231-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(97)00231-4)
13. Guloy A. M., J. D. Corbett. The Lanthanum–Germanium System. Nineteen Isostructural Interstitial Compounds of the La_3Ge_3 . *Inorg. Chem.* 1993. Vol. 32. P. 3532–3540. DOI: <https://doi.org/10.1021/ic00068a025>
14. Gold C., Scheidt E. W., Gross P., Peyker L., Eickerling G. Interplay between crystal field splitting and Kondo effect in $\text{CeNi}_9\text{Ge}_{4-x}\text{Si}_x$. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2012. Vol. 24. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/24/35/355601>
15. Anand V. K., Hossain Z., Geibel C. Magnetic and transport properties of PrTGe_3 (T = Ni, Rh). *Solid State Commun.* 2008. Vol. 146. P. 335–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2008.02.023>
16. Buchholz W., Schuster H. U. Intermetallische Phasen mit B35-Überstruktur und Verwandtschaftsbeziehung zu LiFe_6Ge_6 . *Z. Anorg. Allg. Chem.* 1981. Vol. 482. P. 40–48.
17. Schwarzenbach D. Program LATCON: refine lattice parameters. *Lausanne: University of Lausanne*, 1966.
18. Kraus W., Nolze G. PowderCell for Windows. *Berlin: Federal Institute for Materials Research and Testing*, 1999.
19. Akselrud L. G., Grin Yu. N. WinCSD: software package for crystallographic calculations (Version 4). *J. Fppl Crystallogr.* 2014. Vol. 47. P. 803–805. DOI: <https://doi.org/10.1107/S1600576714001058>
20. Rodriguez-Carvajal J. FULLPROF: A Program for Rietveld Refinement and Pattern Matching Analysis, version 3.5d; *Laboratoire Léon Brillouin (CEA–CNRS): Saclay, France*, 1998.
21. Stetskiy A. O., Havryshchuk L. M. Interaction of components in the La–Li–Ni–Si system at a temperature of 400 °C. *SWorldJournal*. 2024. Issue 24, Part 2. P. 60–67. URL: <https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/issue/view/swj24-02/swj24-02>

REFERENCES:

1. Laffargue, D., Bourée, F., Chevalier, B., Etourneau, A., & Roisnel, T. (1999). Magnetic structure of the antiferromagnetic Kondo stannide $\text{Ce}_2\text{Ni}_2\text{Sn}$. *Phys. B*, 259/261, 46–47. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(98\)00734-0](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(98)00734-0)
2. Schobinger Papamantellos, P., André, G., Rodriguez Carvajal, J., Buschow, K. H. J., & Durivault, L. (2001). Magnetic ordering of $\text{CeNi}_{0.78}\text{Sn}_2$ and $\text{Ce}_3\text{Ni}_2\text{Sn}_7$ compounds by neutron diffraction. *J. Alloys Compd.*, 325, 29–36. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01358-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01358-5)
3. Mudryk, Y. S., Kaczorowski, D., Romaka, L. P., Bodak, O. I., Grytsiv, A. V., et al. (2001). Physical properties and superconductivity of skutterudite-related $\text{Yb}_3\text{Co}_{4.3}\text{Sn}_{12.7}$ and $\text{Yb}_3\text{Co}_4\text{Ge}_{13}$. *J. Phys.: Condens. Matter*, 12, 7391–7402. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/13/33/319>
4. Pavlyuk, V. V., Bodak, O. I., Kevorkov, D. G., & Pecharsky, V. K. (1993). Doslidzhennya tverdykh rozchyniv $\text{LaLi}_x\text{Cu}_{2-x}\text{Si}_2$ ta $\text{LaLi}_x\text{Cu}_{2-x}\text{Ge}_2$ v systemakh {La, Ce}–Li–Cu–{Si, Ge} pry 470 K [Investigation of $\text{LaLi}_x\text{Cu}_{2-x}\text{Si}_2$ and $\text{LaLi}_x\text{Cu}_{2-x}\text{Ge}_2$ solid solutions in the {La, Ce}–Li–Cu–{Si, Ge} systems at 470 K]. *Dop. AN of Ukraine*, 9, 87–89 (in Ukrainian).
5. Matviyishyn, R. I. (2009). Vzaemodia Erbiu z perehidnimi metalami (Co, Ni), Litiem ta p-elementami IV grupi [Interaction of Erbium with transition metals (Co, Ni), Lithium and p-elements of group IV (Si, Ge)]. *Avtoref. dis.... k-ta khim. nauk*. Lviv. (in Ukrainian).
6. Pavlyuk, V., Stetskiy, A., & Rozdzyńska-Kielbik, B. (2013). The isothermal section of the phase diagram of Li–La–Ge system at 400 °C. *Intermetallics*, 43, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.07.002>

7. Schuster, H. U., & Czybulka, A. (1974). Die phase Li_2CeGe . *Z. Naturforsch.*, 29B, 9–10. <https://doi.org/10.1515/znb-1974-9-1012>
8. Jung, Y., Nam, G., Jeon, J., Kim, Y., & You, T.S. (2012). Crystal structure and chemical bonding of novel Li-containing polar intermetallic compound $\text{La}_{11}\text{Li}_{12}\text{Ge}_{16}$. *J. of Solid State Chemistry*, 196, 543–549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2012.07.034>
9. Fornasini, M. L., Palenzona, A., & Pani, M. (2012). Crystal chemical features of ternary phases in the $R\text{--Li--Ge}$ (R – rare earth element) systems. *Intermetallics*, 31, 114–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.06.011>
10. Nam, G., Jeon, J., Kim, Y., Kang, S. K., & You, T.S. (2013). Combined effect of chemical pressure and valence electron concentration through the electron-deficient Li substitution on the $RE_4\text{LiGe}_4$ ($RE = \text{La, Ce, Pr, and Sm}$) system. *J. of Solid State Chemistry*, 205, 10–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JSSC.2013.06.027>
11. Zhuang, Y., Hu, Z., Liu, J., Lü, J., & Yan, J. (2005). The 523 K isothermal section of La–Ni–Ge ternary system phase diagram. *J. Alloys Compd.*, 387, 239–242. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.06.065>
12. Morozkin, A. V., Seropegin, Yu. D., Gribanov, A. V., Sviridov, I. A., & Kurenbaeva, J. M. (1998). Analysis of the melting temperatures of RTX_2 (CeNiSi_2 structure) and RT_2X_2 (CeGa_2Al_2 structure) compounds [$R = \text{La, Ce, Sm, Er, Tm}$; $T = \text{Fe, Co, Ni}$; $X = \text{Si, Ge}$]. *J. Alloys Compd.*, 264, 190–196. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(97\)00231-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(97)00231-4)
13. Guloy, A. M., & Corbett, J. D. (1993). The Lanthanum-Germanium System. Nineteen Isostructural Interstitial Compounds of the La_5Ge_3 . *Inorg. Chem.*, 32, 3532–3540. DOI: <https://doi.org/10.1021/ic00068a025>
14. Gold, C., Scheidt, E. W., Gross, P., Peyker, L., & Eickerling, G. (2012). Interplay between crystal field splitting and Kondo effect in $\text{CeNi}_9\text{Ge}_{4-x}\text{Si}_x$. *J. Phys.: Condens. Matter*, 24, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/24/35/355601>
15. Anand, V. K., Hossain, Z., & Geibel, C. (2008). Magnetic and transport properties of PrTGe_3 ($T = \text{Ni, Rh}$). *Solid State Commun.*, 146, 335–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2008.02.023>
16. Buchholz, W., & Schuster, H. U. (1981). Intermetallische Phasen mit B35-Überstruktur und Verwandtschaftsbeziehung zu LiFe_6Ge_6 . *Z. Anorg. Allg. Chem.*, 482, 40–48.
17. Schwarzenbach, D. (1966). Program LATCON: refine lattice parameters. Lausanne: University of Lausanne.
18. Kraus, W., & Nolze, G. (1999). PowderCell for Windows. Berlin: Federal Institute for Materials Research and Testing.
19. Akselrud, L. G., & Grin, Yu. N. (2014). WinCSD: software package for crystallographic calculations (Version 4). *J. Appl. Crystallogr.*, 47, 803–805. DOI: <https://doi.org/10.1107/S1600576714001058>
20. Rodriguez-Carvajal, J. (1998). FULLPROF: A Program for Rietveld Refinement and Pattern Matching Analysis, version 3.5d. Laboratoire Léon Brillouin (CEA–CNRS): Saclay, France.
21. Stetskiv, A. O., & Havryshchuk, L. M. (2024). Interaction of components in the La–Li–Ni–Si system at a temperature of 400 °C. *SWorldJournal*, 24(2), 60–67. Retrieved from <https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/issue/view/swj24-02/swj24-02>

ЕКОЛОГІЯ

УДК 502.175:502.3

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-8>

Костянтин ГРИГОР'ЄВ

аспірант кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили
вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, Україна, 54003

ORCID: 0000-0003-2804-2758

Scopus Author ID: 49963356000

Бібліографічний опис статті: Григор'єв, К. (2025). Викиди хімічних поліутантів автотранспортом у місті Миколаєві під час війни. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 58–63, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-8>

ВИКИДИ ХІМІЧНИХ ПОЛІУТАНТІВ АВТОТРАНСПОРТОМ У МІСТІ МИКОЛАЄВІ ПІД ЧАС ВІЙНИ

Стаття присвячена дослідженню фактичних розмірів викидів хімічних поліутантів групами авто міського громадського та транзитного (зокрема, військового) автотранспорту. Проаналізовано валовий викид хімічних сполук від громадського автотранспорту міста, представлено порівняльний аналіз викидів CO, NO, NO₂, SO₂, неметанових летких органічних речовин, метану, аміаку, CO₂, бензапірену від різних груп автомобілів, які використовуються у транспортній системі міста.

Метою роботи виступали дослідження техногенного навантаження на міську екосистему від громадського транспорту, на прикладі м. Миколаєва. Матеріалами дослідження виступали: дані про інфраструктуру громадського автотранспорту м. Миколаєва за 2022–2024 рр. Показано, що транспортна система Миколаєва є важливою частиною інфраструктури міста та регіону, забезпечуючи зв'язок із іншими містами та районами. Переважання в транспортній інфраструктурі міста малих авто з дизельними двигунами відображається на викидах екологічних поліутантів в атмосферний простір міста.

Представлено розрахунки викидів хімічних сполук від громадського автотранспорту м. Миколаєва за 2024 р. Показано, що громадський автотранспорт з дизельними двигунами (ПАЗ-672, -672А, -672Г, -672М, -672С, -672У, -672Ю) викидає у 2 рази викиди діоксиду і оксиду азоту, неметанових летких органічних сполук та бензапірену. Громадський автотранспорт з бензиновими двигунами викидає до 10 разів більше CO, до 2 разів —SO₂, до 3 разів —CO₂. Показано, що викиди парникових газів CO₂ вантажним транзитним транспортом у 2 рази перевищують понад викиди громадського міського транспорту.

Засвідчена необхідність обов'язкового впровадження у місті екологічних ініціатив, доповнення індикативними вимірюваннями екологічний моніторинг атмосферного повітря у містах з інтенсивними транспортними потоками.

Подальші дослідження планується спрямувати на пошук практичних заходів вдосконалення транспортної інфраструктури міста із запровадженням відомих екологічних ініціатив. Це сприятиме адаптації транспортної системи міста до вимог часу, створюючи сталий мобільний простір для мешканців, а також наближаючи до європейських транспортних систем задля адаптації до зміни клімату та сталого енергетичного розвитку міст.

Ключові слова: викиди хімічних поліутантів, громадський автотранспорт, транзитний автотранспорт, атмосферне повітря.

Kostiantyn GRYGORIEV

Postgraduate Student at the Department of Ecology, Petro Mohyla Black Sea National University,
10 68 Desanynykiv str., Mykolaiv, Ukraine, 54003

ORCID: 0000-0003-2804-2758

Scopus Author ID: 49963356000

To cite this article: Grigoriev, K. (2025). Vykydy khimichnykh poliutantiv avtotransportom u misti Mykolaievi pid chas viiny [Emissions of chemical pollutants by motor vehicles in the city of Mykolaiv during the war]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 58–63, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-8>

EMISSIONS OF CHEMICAL POLLUTANTS BY MOTOR VEHICLES IN THE MYKOLAIV CITY DURING THE WAR

The article is devoted to the study of actual emissions of chemical pollutants by groups of city public and transit vehicles. The author analyzes the gross emissions of chemical compounds from public motor vehicles in the city, and presents a comparative analysis of emissions of CO, NO, NO₂, SO₂, non-methane volatile organic compounds, methane, ammonia, CO₂, and benzopyrene from different groups of vehicles used in the city's transport system.

The purpose of the study was to investigate the anthropogenic load on the urban ecosystem from public transport, using the example of Mykolaiv as an example. The research materials were: data on the public transport infrastructure of Mykolaiv for 2022–2024. The article shows that the transport system of Mykolaiv is an important part of the city and regional infrastructure, providing communication with other cities and districts. The predominance of small cars with diesel engines in the city's transport infrastructure affects the emissions of environmental pollutants into the city's atmospheric space.

Calculations of emissions of chemical compounds from public transport in Mykolaiv for 2024 are presented. It is shown that public transport with diesel engines emits 2 times more nitrogen dioxide and oxide, non-methane volatile organic compounds, and benzopyrene. Public vehicles with gasoline engines emit up to 10 times more CO, up to 2 times more SO₂, and up to 3 times more CO₂. It is shown that the emissions of greenhouse gases CO₂ by freight transit transport are 2 times higher than those of public urban transport.

The necessity of mandatory implementation of environmental initiatives in the city, supplementing the environmental monitoring of atmospheric air in cities with intensive traffic flows with indicative measurements is shown.

Further research is planned to focus on finding practical measures to improve the city's transport infrastructure with the introduction of well-known environmental initiatives. This will help to adapt the city's transport system to the requirements of the times, creating a sustainable mobile space for residents, as well as bringing it closer to European transport systems for climate change adaptation and sustainable energy development of cities.

Key words: emissions of chemical pollutants, public transport, transit vehicles, atmospheric air.

Актуальність проблеми. Зростаючі темпи урбанізації сучасного суспільства призводять до збільшення концентрації антропогенних джерел негативної дії на довкілля на досить обмежених територіях (значні міста і мегаполіси). Для міст, вздовж які проходять міжміські автотранспортні магістралі, питання забруднення атмосферного повітря є одним з актуальних екологічних питань, які потребують свого вирішення.

Екологічні проблеми міської транспортної системи характерні для багатьох міст України (Лежнева, 2017, с. 58), особливо у містах з інтенсивним автомобільним рухом. Транзитний автотранспорт впливає також на стан атмосферного повітря у містах. Це стосується також військового транспорту (Чугай, 2023, с. 27).

В Україні ще у 2018 р. затверджено Національну транспортну стратегію «Drive Ukraine 2030», яка має допомогти інтегрувати Україну в єдину автотранспорту систему ЄС з використанням екологічних та енергозощадливих технологій. Тому потрібно дослідити техногенне навантаження на екосистему міста від комунального та транзитного автотранспорту та надати рекомендації щодо впровадження провідних екологічних ініціатив (Семененко, 2019, с. 34; Шевченко, 2020, с. 64).

Мета дослідження: дослідити техногенне навантаження на міську екосистему від громадського автотранспорту та оцінити ефективність втілення окремих екологічних ініціатив, які зменшують це техногенне навантаження.

Матеріали і методи дослідження. Для дослідження транспортної інфраструктури м. Миколаєва використано дані щодо інфраструктури транспортної системи міста Миколаєва за 2022–2024 рр. та даних щодо кількості вантажного транспорту, що рухається містом. Розрахунок питомої витрати палива проведено з врахуванням співвідношень: споживання 1 л бензину у бензиновому двигуні відповідає виробленню 12,3 кВт.год енергії; споживання 1 л дизельного палива у дизельному двигуні відповідає виробленню 11,90 кВт.год енергії.

Розрахунок викидів хімічних поллютантів використано здійснено за наступною формулою:

$$Q(\text{тон}) = 0,001 \cdot V(\text{тон}) \cdot \bar{q}(\text{кг/тон}),$$

де Q – фактичний (валовий) об'єм викиду (тон), $V(\text{тон})$ – фактичний об'єм спожитого палива (тон), $\bar{q}$ – усереднені питомі викиди CO₂ (кг/тон).

Усереднені питомі викиди хімічних поллютантів прийнято за відомими нормами за (Беляєв, 2019, с. 141). Зокрема, для CO₂: для бензинового двигуну це становить 3183, а для дизельного – 3138 кг/тон.

Основний матеріал дослідження. На маршрутах міста в середньому працюють 617 одиниць громадського транспорту, серед них: 43 трамваї, 54 тролейбуси, 18 автобусів, до 500 маршрутних автобусів. Міський авто-транспорт станом на початок 2024 р. представлений, за середніми величинами, наступними авто: ПАЗ з дизельними двигунами – 40, автобуси ГАЗ 32213–180 (з газо-бензиновими двигунами) – 236; Мерседес-Бенц Спринтер з бензиновими двигунами – 190; автобуси Атаман з бензиновими двигунами – 36.

Розрахунок фактичного обсягу викидів у повітря хімічних поллютантів від двигунів внутрішнього згоряння громадського автотранспорту свідчив про наступні результати т/рік: CO – 11,68; NO₂ – 15,59; SO₂ – 1,01; неметанові леткі органічні речовини – 17,14; метан – 0,39; NO – 0,03; аміак – 0,002; сажа – 0,40; CO₂ – 214,39; бензапирен – 0,006.

Порівняння викидів хімічних поллютантів для окремих груп авто міського автотранспорту наведено на рис. 1.

З рисунку 1 видно, що громадський авто-транспорт з дизельними двигунами (ПАЗ-672, -672А, -672Г, -672М, -672С, -672У, -672Ю) викидає у 2 рази більше діоксиду і оксиду азоту,

неметанових летких органічних сполук, бензапирену. Громадський автотранспорт з бензиновими двигунами викидає до 10 разів більше CO, до 2 разів —SO₂, до 3 разів —CO₂.

Через м. Миколаїв щорічно (у довійськові роки) проходило близько 15 000 вантажівок (більше 40 вантажівок на день). Велика кількість авто накопичувалася особливо на вулицях міста у сезон перевезень зерна. Це сприяло формуванню підвищених рівнів формальдегіду та інших атмосферних поллютантів в атмосферному просторі м. Миколаєва (Григор'єв, 2023, с. 40). В останні роки досліджень через місто курсувала військова автотехніка. За попередньою оцінкою при таких масштабах курсуючих вантажівок (цивільної чи військової) кількість поллютантів, які викидаються у повітря, наведено у таблиці 2.

Для зменшення викидів хімічних поллютантів в атмосферне повітря нами проведено оцінювання об'ємів збереження паливних ресурсів та об'ємів зниження викидів CO₂ при запровадженні таких екологічних ініціатив, як 1) облаштування системи GPS-навігації на міському пасажирському та комунальному транспорті та інформаційними табло на зупинках, 2) поступовий перехід на автобуси великої та середньої місткості

Таблиця 1

Результати розрахунку валового викиду хімічних сполук від громадського автотранспорту м. Миколаєва

Назва авто	Кількість авто	Кількість спожитого палива,		Викиди забруднюючих сполук в атмосферне повітря, т									
		л/100 км для 1 авто	т/рік для всіх авто	CO	NO ₂	SO ₂	Неметанові леткі органічні речовини	метан	NO	аміак	сажа	CO ₂	Бензапирен
ПАЗ-672, -672А, -672Г, -672М, -672С, -672У, -672Ю з дизельними двигунами	40	34	102	36 92,4	3202,8	438,6	832,32	25,5	12,24	–	392,7	320 076	3,06
ГАЗ 32213 з газо-бензиновими двигунами	236	16	258	51 032	5572,8	258	7353	165,12	9,03	1,032	–	821 214	1,29
Мерседес-Бенц Спринтер з бензиновими двигунами	190	17	208	41 142,4	4492,8	208	5928	133,12	7,28	0,832	–	662 064	1,04
Автобуси Атаман з бензиновими двигунами	36	44	105	20 769	2268	105	2992,5	67,2	3,675	0,42	–	334 215	0,525



Рис. 1. Порівняння валового викиду CO (а), NO₂ (б), NO (в), C₂₀H₁₂ (г) між групами авто міського автотранспорту

Таблиця 2

**Результати розрахунку валового викиду
хімічних поллютантів від транзитного
вантажного транспорту, т/рік**

Хімічна сполука	Вантажні авто з бензиновими двигунами	Вантажні авто з двигунами на дизельному паливі
Оксид вуглецю (CO)	17,678	3,171
Двоокис азоту (NO ₂)	1,840	2,751
Двоокис сірки (SO ₂)	0,088	0,075
Оксид азоту	0,016	0,014
Неметанові леткі органічні сполуки	4,643	0,270
Вуглекислий газ	278,831	274,889

Облаштування системи GPS-навігації на міському пасажирському та комінальному транспорті та інформаційними табло на зупинках.

Розрахунки економії природних ресурсів наступні. Внаслідок запровадження цього заходу орієнтовано не менше 1000 осіб перейшли б на громадський електротранспорт. Ці 1000 осіб використовували 500 автомобілів щодні. Середній щоденний пробіг автомобілів в м. Миколаєві дорівнює 25 км. Середня витрата пального по місту дорівнює 9 л на 100 км.

Розрахунок економії витрат палива:

$$500 \text{ авто} \cdot 25 \text{ км} \cdot 270 \text{ роб.днів} \cdot \frac{0,09 \text{ л}}{1000} \cdot 0,750 \cdot 12,3 = 2801 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$$

Економитись буде бензин, оскільки значна більшість легкового автотранспорту використовує бензин в якості пального. Орієнтовано це складе на рік: 114 тон, або 1401 МВт-год енергії від бензинових двигунів. Розрахунки зменшення викидів CO₂ свідчили, що це становитиме приблизно 350 т/рік.

Перехід на авто більшої пасажиромісткості.

У місті Миколаєва для комунальних перевезень використовуються за-звичай автобуси малої місткості: Газель, Mercedes Sprinter, Volkswagen LT – приблизно 800 штук. Усі діючі автобуси малої пасажиромісткості – бензинові, витрати палива малих автобусів приблизно 14 л на 100 км, місткість цих автобусів – 18 людей для перевезення. При запровадженні автобусів більшої місткості (типу «Богдан А701») з пасажиромісткістю до 40 осіб, вид палива – дизель; витрати палива на 100 км – 40 л.

Підрахунок зроблено для запланованої чисельності придбання автобусів (800 штук),

що становить 65,3 % від їхньої загальної кількості (1226 штук).

$104\,983 \text{ МВт} \cdot \text{год} \cdot 65,3 \% = 68\,554 \text{ МВт} \cdot \text{год}$ – це річне споживання цими 800 маршрутними таксі.

$$\frac{68\,554}{800} = 85,7 \text{ МВт} \cdot \text{год} \text{ – річне споживання}$$

одним автобусом малої місткості

При витраті палива 40 л на 100 км автобус великої місткості в 2,86 рази більш витратний за малі автобуси, але в 4,52 рази місткіший.

$$68\,554 \cdot \frac{2,86}{4,52} = 43\,377 \text{ МВт} \cdot \text{год} \text{ – річне спо-}$$

живання дизельного палива 177 автобусами

$$68\,554 - 43\,377 = 25\,177 \text{ МВт} \cdot \text{год економії}$$

дизельного палива

Розрахунок зменшення викидів CO₂ показав величину 6294 т/рік.

Висновки і перспективи подальших досліджень

1. Транспортна система Миколаєва є важливою частиною інфраструктури міста та регіону, забезпечуючи зв'язок із іншими містами та районами. Переважання в транспортній інфраструктурі міста малих авто з дизельними двигунами відображається на викидах екологічних поллютантів в атмосферний простір міста.

2. Розраховано, що валовий викид хімічних сполук від громадського автотранспорту м. Миколаєва складає величини, т/рік: CO – 11,68; NO₂ – 15,59; SO₂ – 1,01; неметанові леткі органічні речовини – 17,14; метан – 0,39; NO – 0,03; аміак – 0,002; сажа – 0,40; CO₂ – 214,39; бензапірен – 0,006.

3. Громадський автотранспорт з дизельними двигунами (ПАЗ-672, -672А, -672Г, -672М, -672С, -672У, -672Ю) викидає у 2 рази викиди діоксиду і оксиду азоту, неметанових летких органічних сполук та бензапірену. Громадський автотранспорт з бензиновими двигунами викидає до 10 разів більше CO, до 2 разів —SO₂, до 3 разів —CO₂.

4. Валовий об'єм викидів у повітря хімічних поллютантів від двигунів внутрішнього згорання транзитного вантажного транспорту становить: CO – 20,85; NO₂ – 4,62; SO₂ – 0,163; NO – 0,03; неметанові леткі органічні речовини – 4,91; CO₂ – 553,72. Викиди парникових газів CO₂ вантажним транзитним транспортом у 2 рази перевищують понад викиди громадського міського транспорту.

5. Подальші дослідження планується спрямувати на пошук практичних заходів вдосконалення транспортної інфраструктури міста із запровадженням відомих екологічних ініціатив, впроваджених в європейських містах. Це в цілому сприятиме адаптації транспортної

системи міста до вимог часу, створюючи комфортні, безпечні умови та сталий мобільний простір для своїх мешканців, а також наближаючи до європейських транспортних систем задля адаптації до зміни клімату та сталого енергетичного розвитку міст.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Беляев С. В. *Екологічні проблеми транспорту і шляхи їх вирішення*. К. : Вища школа, 2019, 231.
2. Гаврилюк О. А. Екологічний вплив автотранспорту на довкілля: глобальні та локальні проблеми. *Екологія і життя*, 2021, 3(22), 42–47.
3. Григор'єв К. В. Оцінка стану атмосферного повітря у місті Миколаєві. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, Вип. 4, 2023, 39–48.
4. Лежнева О. І., Желновач Г. М., Очеретенко С. В. та ін. Екологічні аспекти транспортної системи міста: *монографія*. Харків : Зebra, 2017. 180 с.
5. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів». URL: <https://ips.ligazakon.net/document/FIN42578>.
6. План дій сталого енергетичного розвитку та клімату міста Миколаєва до 2030 року. Миколаїв, 2019. 156 с.
7. Семененко Ю. М., Коваленко С. І. Зелені технології в транспорті: екологічні аспекти». *Екологічний вісник*, 2019, 2, 31–35.
8. Стратегія адаптації до зміни клімату для Миколаївської області: Посилення спроможності регіональних та місцевих органів влади для впровадження та застосування законодавства ЄС у сферах захисту навколишнього середовища, протидії кліматичним змінам та розвитку інфраструктурних проєктів. Миколаїв, 2024. 77 с.
9. Чугай А. В., Чернякова О. І., Клімов І. О. Аналіз впливу військової діяльності в Україні на стан атмосферного повітря. *Екологічні науки*, 4(49), 26–31.
10. Шевченко О. І. Сучасні екологічні технології для зменшення шкідливих викидів транспортом. *Транспорт та довкілля*, 2020, 4(15), 60–67.

REFERENCES:

1. Beliaev, S. V. (2019). *Ekolohichni problemy transportu i shliakhy yikh vyrishennia* [Environmental problems of transport and ways to solve them]. *Iyshcha shkola*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Havryliuk, O. A. (2021). *Ekolohichniy vplyv avtotransportu na dovkillia: hlobalni ta lokalni problem* [Environmental impact of motor vehicles on the environment: global and local problems]. *Ekolohiia i zhyttia*. Kyiv [in Ukrainian].
3. Hryhoriev, K. V. (2023). *Otsinka stanu atmosferного povitria u misti Mykolaievi* [Assessment of the state of atmospheric air in the city of Mykolaiv]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku*. Kyiv [in Ukrainian].
4. Lezhneva, O. I., Zhelnovach, H. M., Ocheretenko, S. V. (2017). *Ekolohichni aspekty transportnoi systemy mista: monohrafiia* [Environmental aspects of the city's transport system: a monograph]. Kharkiv [in Ukrainian].
5. *Metodyka rozrakhunku vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn ta parnykovykh haziv u povitria vid transportnykh zasobiv*» [Methodology for calculating emissions of pollutants and greenhouse gases into the air from vehicles]. Retrieved from: <https://ips.ligazakon.net/document/FIN42578>
6. *Plan dii staloho enerhetychnoho rozvytku ta klimatu mista Mykolaieva do 2030 roku* [Action Plan for Sustainable Energy Development and Climate of the City of Mykolaiv until 2030]. (2019). Mykolaiv [in Ukrainian].
7. Semenenko, Yu. M., & Kovalenko, S. I. (2019). *Zeleni tekhnologii v transporti: ekolohichni aspekty* [Green technologies in transport: environmental aspects]. *Ekolohichniy visnyk*. Kyiv [in Ukrainian].
8. *Stratehiia adaptatsii do zminy klimatu dlia Mykolaivskoi oblasti: Posylennia spromozhnosti rehionalnykh ta mistsevykh orhaniv vlady dlia vprovadzhenia ta zastosuvannia zakonodavstva YeS u sferakh zakhystu navkolyshnoho sredovyscha, protydii klimatychnym zminam ta rozvytku infrastrukturykh proektiv* [Climate Change Adaptation Strategy for Mykolaiv Oblast: Strengthening the capacity of regional and local authorities to implement and enforce EU legislation in the areas of environmental protection, climate change and infrastructure project development]. (2024). Mykolaiv [in Ukrainian].
9. Chuhai, A. V., Cherniakova, O. I., Klimov, I. O. (2023). *Analiz vplyvu viiskovoi diialnosti v Ukraini na stan atmosferного povitria* [Analysis of the impact of military activities in Ukraine on the state of atmospheric air]. *Ekolohichni nauky*, Kyiv [in Ukrainian].
10. Shevchenko, O. I. (2020). *Suchasni ekolohichni tekhnologii dlia zmenshennia shkidlyvykh vykydiv transportom* [Modern environmental technologies for reducing harmful emissions from transport]. *Transport ta dovkillia*. Kyiv [in Ukrainian].

УДК 552.573: 66.040.2: 661.183.2

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-9>

Володимир КУЧЕРЕНКО

доктор хімічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу хімії вугілля,
Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л. М. Литвиненка

Національної академії наук України, вул. Харківське шосе, 50, м. Київ, Україна, 02155

ORCID: 0000-0001-7234-947X

Scopus Author ID: 7005252259

Юлія ТАМАРКІНА

кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник відділу досліджень нуклеофільних реакцій,
Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л. М. Литвиненка

Національної академії наук України, вул. Харківське шосе, 50, м. Київ, Україна, 02155

ORCID: 0000-0002-8747-4481

Scopus Author ID: 6507643028

Анастасія РЕДЬКО

провідний інженер відділу хімії вугілля, Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії

імені Л. М. Литвиненка Національної академії наук України, вул. Харківське шосе, 50, м. Київ, Україна, 02155

ORCID: 0000-0001-9768-4020

Scopus Author ID: 58503199300

Іріна ФРОЛОВА

кандидат хімічних наук, науковий співробітник відділу хімії вугілля, Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л. М. Литвиненка Національної академії наук України, вул. Харківське шосе, 50, м. Київ, Україна, 02155

ORCID: 0000-0001-9660-5474

Scopus Author ID: 7006413160

Бібліографічний опис статті: Кучеренко, В., Тамаркіна, Ю., Редько, А., Фролова, І. (2025). Адсорбенти, отримані азотнокислотним інтеркалюванням та лужною активацією антрациту. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 64–76, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-9>

АДСОРБЕНТИ, ОТРИМАНІ АЗОТНОКИСЛОТНИМ ІНТЕРКАЛЮВАННЯМ ТА ЛУЖНОЮ АКТИВАЦІЄЮ АНТРАЦИТУ

Мета. Визначення адсорбційних властивостей вуглецевих адсорбентів (ВА), отриманих азотнокислотним інтеркалюванням антрациту з наступною лужною активацією.

Методологія. Інтеркалювання з утворенням нітрату антрациту здійснювали продуванням антрациту паровою HNO_3 (57 %) при 140 °С. Активацію з утворенням ВА виконували нагріванням імпрегнованого лугом (KOH) антрациту до 800 °С з ізотермічною витримкою 1 год, охолодженням, відмиванням від луку та сушінням. Характеристики пористості ВА розраховано за ізотермами низькотемпературної (77 K) адсорбції – десорбції азоту (метод 2D-NLDFT-HS). Адсорбційні вимірювання виконано при 25 °С та постійному вмісті ВА (1 г/л) у водних розчинах. Дані з кінетики адсорбції розраховано моделями псевдо-першого і псевдо-другого порядку та внутрішньочасткової дифузії. Ізотерми адсорбції апроксимовано моделями Ленгмюра та Фрейндліха.

Наукова новизна. Вперше досліджено адсорбцію 4-хлорфенолу (ХФ), барвника метиленового блакитного (МБ) та катіонів свинцю з водних розчинів (25 °С) новими адсорбентами. Встановлено, що адсорбційна рівновага досягається за 2–4 год залежно від адсорбату. Кінетика адсорбції підпорядковується рівнянню псевдо-другого порядку. Початкові швидкості збільшуються в ряду адсорбатів МБ < Рb(II) < ХФ і за величиною різняться у 49 разів. Швидкість адсорбції лімітується взаємодією адсорбатів з поверхневими адсорбційними центрами. Ізотерми адсорбції апроксимуються моделлю Ленгмюра краще ніж моделлю Фрейндліха. Ємності насичених

шарів адсорбатів, які розраховано з моделі Ленгмюра, є найбільшими у адсорбента з нітрату антрациту, підвищуються в ряді $Pb(II) < MB < XF$ та становлять 1,80 ммоль/г, 2,34 ммоль/г та 4,90 ммоль/г, відповідно. Ступінь вилучення адсорбатів збільшується зі зменшенням їх концентрації у воді та досягає 99,7 % для XF та 90 % для MB та катіонів $Pb(II)$. Ефективність вилучення сполук адсорбентами за першу хвилину складає $\leq 4,6$ % для MB, $\leq 20,9$ % для $\leq 4,6$ % для $Pb(II)$ та $\leq 50,7$ % для XF. Отримані характеристики адсорбційної активності антрацитових адсорбентів ілюструють їх високу ефективність при очищенні води від екотоксикантів.

Ключові слова: антрацит, інтеркалювання, лужна активація, вуглецевий адсорбент, екотоксикант.

Volodymyr KUCHERENKO

Doctor of Chemical Sciences, Senior Researcher, Head of the Coal Chemistry Department,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, 50 Kharkivske shose str., Kyiv, Ukraine, 02155
ORCID: 0000-0001-7234-947X
Scopus Author ID: 7005252259

Yuliia TAMARKINA

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher at the Department of Investigations of Nucleophilic Reactions, L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, 50 Kharkivske shose str., Kyiv, Ukraine, 02155
ORCID: 0000-0002-8747-4481
Scopus Author ID: 6507643028

Anastasia REDKO

Leading Engineer at the Department of Coal Chemistry, L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, 50 Kharkivske shose str., Kyiv, Ukraine, 02155
ORCID: 0000-0001-9768-4020
Scopus Author ID: 58503199300

Irina FROLOVA

Candidate of Chemical Sciences, Researcher at the Department of Coal Chemistry, L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, 50 Kharkivske shose str., Kyiv, Ukraine, 02155
ORCID: 0000-0001-9660-5474
Scopus Author ID: 7006413160

To cite this article: Kucherenko, V., Tamarkina, Yu., Redko, A., Frolova, I. (2025). Adsorbenty, otrymani azotnokyslotnym interkaliuvanniam ta luzhnoiu aktyvatsiieiu antratsytu [Adsorbents obtained by nitric acid intercalation and alkaline activation of anthracite]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 64–76, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-9>

ADSORBENTS OBTAINED BY NITRIC ACID INTERCALATION AND ALKALINE ACTIVATION OF ANTHRACITE

Purpose. Determination of the adsorption properties of carbon adsorbents (CAs) obtained from anthracite by nitric acid intercalation followed alkaline activation.

Methodology. Intercalation with the formation of anthracite nitrate was carried out by blowing anthracite with vapor-phase HNO_3 (57 %) at 140 °C. Activation with the formation of CAs was performed by heating anthracite impregnated with alkali (KOH) up to 800 °C with an isothermal holding of 1 h, cooling, washing from alkali and drying. The CA porosity characteristics were evaluated using low-temperature (77K) nitrogen adsorption-desorption isotherms (2D-NLDFT-HS method). Adsorption measurements were performed at 25 °C and a constant CA content (1 g/L) in aqueous solutions. Adsorption kinetics data were calculated using pseudo-first and pseudo-second order models and intraparticle diffusion. Adsorption isotherms were approximated by Langmuir and Freundlich models.

Originality. For the first time, the adsorption of 4-chlorophenol (CPh), methylene blue dye (MB) and lead cations from aqueous solutions (25 °C) by new adsorbents was investigated. Adsorption equilibrium was found to be reached in 2–4 h depending on the adsorbate. The adsorption kinetics obeys a pseudo-second-order equation. The initial rates increase in the adsorbate series $MB < Pb(II) < CPh$ and differ in magnitude by 49 times. The adsorption rate is limited by

the interaction of adsorbates with surface adsorption centers. The adsorption isotherms are better approximated by the Langmuir model than by the Freundlich one. The saturated layer capacities of adsorbates, calculated from the Langmuir model, are the largest in the anthracite nitrate adsorbent, increase in the order $Pb(II) < MB < HF$ and are 1.80 mmol/g, 2.34 mmol/g and 4.90 mmol/g, respectively. The degree of adsorbate extraction increases with decreasing concentration in water and reaches 99.7 % for CPh and 90 % for MB and $Pb(II)$ cations. The efficiency of compound extraction by adsorbents in the first minute is ≤ 4.6 % for MB, ≤ 20.9 % for ≤ 4.6 % for $Pb(II)$ and ≤ 50.7 % for CPh. The obtained characteristics of the adsorption activity of anthracite adsorbents justify their high efficiency in purifying water from ecotoxics.

Key words: anthracite, intercalation, alkaline activation, carbon adsorbent, ecotoxics

Актуальність проблеми Розвиток промисловості призвів до багатьох екологічних проблем, зокрема забруднення водного середовища. Одним із ефективних методів очищення води від екотоксикантів є адсорбція з використанням вуглецевих адсорбентів (ВА), зокрема, отриманих лужною активацією. Тільки в цьому процесі утворюються ВА з питомою площею поверхні вище 3000 м²/г, наприклад, ВА з кам'яновугільного пеку (3145 м²/г) (Wei, 2019), бітуму (3851 м²/г) (Javed, 2018), антрациту (4012 м²/г) (Hamuyali, 2022), карбамід-формальдегідної смоли (4547 м²/г) (Tiwari, 2018). Сьогодні лужна активація частіше застосовується для отримання ВА з біомаси (Gayathiri, 2022), але вона містить мало вуглецю та утворює ВА з невеликими виходами (≤ 20 %). Це потребує додаткових стадій отримання збагаченого вуглецем прекурсору, зокрема карбонізації при 200 – 500 °C (Seow, 2022). Але, є природні речовини, а саме антрацити, які вже мають високий вміст вуглецю (90–96 %). При лужній активації вони утворюють ВА з високими виходами та поверхнею до 4012 м²/г (Hamuyali, 2022), які можуть бути ефективними адсорбентами екотоксикантів. З цих причин дослідження термохімічних перетворень антрациту у ВА та визначення їх адсорбційних властивостей є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Антрацити є низькорекційними речовинами і для їх конверсії в ВА потрібно використання значної кількості активатору – 3–6 г КОН на 1 г антрациту (Hamuyali, 2022; Shi, 2021; Liu, 2021; Ma, 2022). Його зниження можна досягти підвищенням реакційної здатності антрациту попередньою хімічною модифікацією, зокрема інтеркалюванням у реакціях з окисниками (Lyubchik, 2004). Цей процес передбачає розшарування антрацитових кристалітів на окремі графенові фрагменти, що полегшує подальшу взаємодію з КОН за підвищених температур. Прототипом підходу є інтеркалювання графіту,

при якому графені просторово розділяються частинками-інтеркалантами, а при більш жорсткому окисненні ($KClO_3$ або $KMnO_4$ у кислотних середовищах) графені трансформуються в оксиди графену (Гаврилюк, 2015).

Ефективним інтеркалюючим реагентом є HNO_3 , яка поєднує функції донора частинок-окисників (катионів нітронію NO_2^+) та частинок-інтеркалантів (нітрат-аніонів NO_3^-). Обробка антрациту рідкофазною HNO_3 (71 %, 120 °C, 5 год) оксидеструктує аліфатичні зв'язки між кристалітами та трансформує графенові фрагменти в оксиди графену (Lee, 2021)]. Інтеркалювання антрациту паровою HNO_3 (98 %) протягом 72 год (20–25 °C) підвищує питому поверхню ВА з 277 м²/г до 597 м²/г при активації діоксидом вуглецю (850 °C, 8 год) або з 422 м²/г до 1139 м²/г при активації водяною парою (850 °C, 2 год) (Lyubchik, 2004). Взаємодія антрациту з паровою HNO_3 (57 %) за підвищеної температури (140 °C), яку вперше вивчено у роботі (Сапунов, 1986), зменшує тривалість інтеркалювання до ~30 хв і веде до утворення нітрату антрациту (НА) з інтеркальованими нітрат-аніонами. Було припущено, що такий інтеркальований антрацит та продукт його швидкого нагрівання (теплого удару) можуть утворювати ВА з великою поверхнею та високою адсорбційною активністю при лужній активації з невеликою кількістю КОН (≤ 1 г/г), але дані про такі дослідження в літературі відсутні.

Мета дослідження – визначити характеристики пористої структури та адсорбційні властивості адсорбентів, отриманих азотнокислотним інтеркалюванням антрациту з наступною лужною активацією.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконано на зразку антрациту з вологістю $W^a = 0,8$ %, зольністю $A^d = 2,8$ %, виходом летких продуктів $V^{daf} = 3,2$ % (розмір частинок 1,0–1,6 мм). Елементний склад органічної вугільної речовини (% daf): С 95,1; Н 2,0; N 0,5; S 1,7; О 0,7 (за різницею), де daf (dry ash

free basis) означає розрахунок на суху беззолну масу вугілля.

Застосовано три наступні методи термохімічної обробки.

1. Інтеркалювання з отриманням нітрата антрацита (НА). Виконували продуванням антрацита (А) парофазною HNO_3 (57 %) при 140 °С протягом 30 хв, коли досягається найбільша ступінь інтеркалювання (Сапунов, 1986).

2. Тепловий удар. Здійснювали швидким введенням зразка в нагріту до 800 °С зону реактора та ізотермічною витримкою 1 год (Кучеренко, 2016). Реактор попередньо продували аргонном (99,996 %). Таким чином отримано антрацит термолізований (АТ) та нітрат антрациту термолізований (НАТ).

3. Лужна активація з отриманням ВА. Лужну обробку виконували імпрегнуванням, яке включало змішування антрациту (10 г) і водного розчину KOH (30 %), витримку 24 год при кімнатній температурі та сушіння (120 ± 10 °С, ≥ 2 год). Вагове співвідношення $\text{KOH}/\text{антрацит}$ $R_{\text{KOH}} = 1$ г/г прийнято невеликим та постійним для всіх зразків. Зразки ВА отримували нагріванням (4 град/хв) імпрегнованого вугілля в аргоні до 800 °С з витримкою 1 год, охолодженням, відмиванням від сполук калію та сушінням (120 ± 5 °С). Похибка визначення виходу ВА (Y, %) становить ± 2 %.

Послідовність обробок та позначення зразків показано нижченаведеною схемою 1.

Тут А – антрацит; НА – нітрат антрациту; АТ та НАТ – антрацит і нітрат антрациту, термолізовані тепловим ударом; ВА(НА), ВА(НАТ), ВА(АТ), ВА(А) – зразки адсорбентів з НА, НАТ, АТ та вихідного антрациту, відповідно.

Характеристики пористої структури ВА визначено за ізотермами низькотемпературної

(77 К) адсорбції – десорбції азоту (прилад Micromeritics ASAP 2020). Перед вимірюваннями зразки ВА дегазували 20 год (200 °С). Загальний об'єм пор V_t (см³/г) визначали за кількістю азоту, адсорбованого при відносному тиску $p/p_0 \sim 1.0$. Методом 2D-NLDFT-HS (2-Dimensional Non-local Density Functional Theory, Heterogenous Surface) (Jagiello, 2013) (програма SAIEUS) розраховували інтегральні та диференційні залежності питомої поверхні S (м²/г) та об'єму пор V (см³/г) від середнього діаметру пор (D , нм). З інтегральних залежностей « $V-D$ » та « $S-D$ » визначали об'єми ультрамікропор (V_{umi}), супермікропор (V_{smi}), субнанопор (V_{1nm}) та мікропор (V_{mi}); $V_{mi} = V_{umi} + V_{smi}$. Сумарний об'єм мезо- і макропор розраховували за різницею $V_{me+ma} = V_t - V_{mi}$. Аналогічно визначали питому поверхню ультрамікропор (S_{umi}), супермікропор (S_{smi}), субнанопор (S_{1nm}), мікропор (S_{mi}) та сумарну поверхню мезо- і макропор (S_{me+ma}). Позначення пор та їх середні діаметри прийнято відповідно до рекомендації IUPAC (Thommes, 2015): ультрамікropори ($D \leq 0,7$ нм), супермікropори ($D = 0,7-2,0$ нм), мікropори ($D \leq 2,0$ нм). Зазначені вище категорії пор об'єднуються терміном «нанопори» з верхньою межею $D \leq 100$ нм (Thommes, 2015).

Адсорбційні властивості антрацитових ВА протестовано поглинанням 4-хлорфенолу (ХФ), барвника метиленового блакитного (МБ) та катіонів Pb(II) , які є типовими представниками органічних екотоксикантів і важких металів та найчастіше використовуються для характеристики вуглецевих матеріалів (Garba, 2019; Ghorbani, 2020; Oladoye, 2022). Адсорбційну ємність $A_{ад}$ (ммоль/г), де АД – ХФ, МБ або Pb(II) в розчині $\text{Pb(NO}_3)_2$ визначали наступним чином. Наважку ($m = 0.100$ г) висушеного

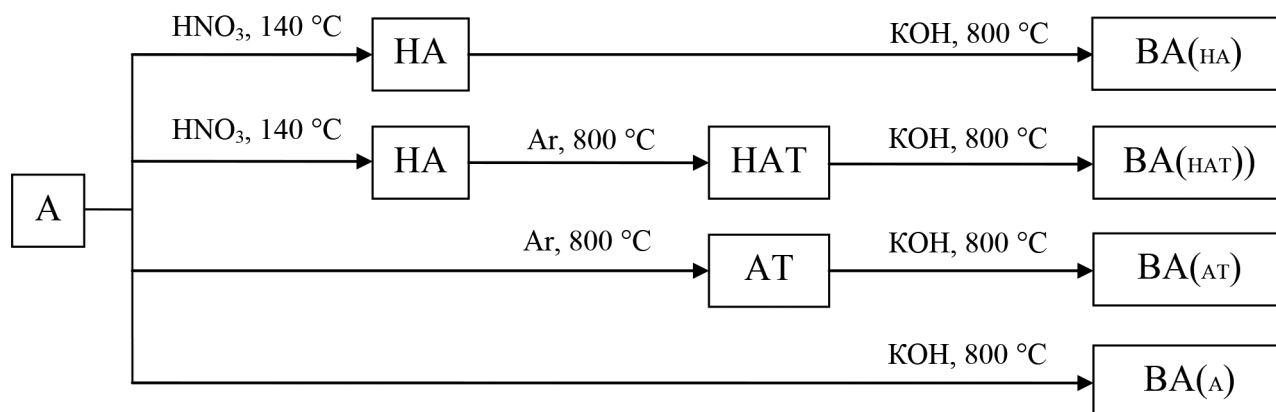


Схема 1. Послідовність отримання продуктів інтеркалювання, термолізу та активації антрациту

Таблиця 1

Характеристики пористої структури антрацитових адсорбентів

Зразок	Параметр пористої структури					
	Об'єми пор, см ³ /г					
	V_t	V_{umi}	V_{smi}	V_{1nm}	V_{mi}	V_{me+ma}
BA(A)	0,175	0,001	0,151	0,093	0,152	0,023
BA(AT)	0,166	0,001	0,146	0,090	0,147	0,019
BA(HA)	1,418	0,174	0,597	0,560	0,771	0,647
BA(HAT)	0,960	0,236	0,228	0,450	0,464	0,496
Зразок	Питома площа поверхні пор, м ² /г					
	S	S_{umi}	S_{smi}	S_{1nm}	S_{mi}	S_{me+ma}
BA(A)	318	3	312	205	315	3
BA(AT)	311	3	306	207	309	2
BA(HA)	1995	556	1260	1503	1816	179
BA(HAT)	1468	804	561	1341	1365	103

при 120 ± 10 °C зразка ВА вводили в водний розчин (100 см³) адсорбату заданої початкової концентрації ($C_{AD(0)}$, ммоль/л) та струшували при $25,0 \pm 0,1$ °C (200 об/хв, баня-шейкер MAXTURDY-45). Вміст ВА в розчині адсорбату був постійним – 1 г/л. Після закінчення заданого часу суміш фільтрували та вимірювали поточну концентрацію C_{AD} (при вимірі кінетики адсорбції) або рівноважну концентрацію $C_{AD(e)}$ (при реєстрації ізотерм адсорбції). Концентрацію ХФ та МБ визначали порівнянням з калібрувальними графіками оптичної щільності розчину, вимірюючи спектрофотометром Perkin-Elmer Lambda 20 при довжинах хвиль 280 нм та 665 нм, відповідно. Концентрацію Pb(II) визначали титруванням розчином трилону-Б у присутності індикатора ксиленолового оранжевого. Адсорбційну ємність A_{AD} розраховували за формулою $A_{AD} = (C_{AD(0)} - C_{AD}) \times V/m$. Кінетику адсорбції виміряно при двох початкових концентраціях адсорбатів: 1 ммоль/л та 5 ммоль/л.

Дані по кінетиці адсорбції апроксимували моделями псевдо-першого порядку $A_{AD} = A_{AD(L)}[1 - \exp(-k_1 \tau)]$, псевдо-другого порядку $A_{AD} = k_2 A_{AD(e)}^2 \tau / (1 + k_2 A_{AD(e)} \tau)$ та внутрішньочасткової дифузії $A_{AD} = k_d \tau^{0.5} + C$, де k_1 , k_2 , k_d – коефіцієнти; τ – час адсорбції (Revellame, 2020; Wang, 2022). Початкову швидкість адсорбції визначено за формулою $R_{AD(0)} = k_2 A_{AD(e)}^2$. Ізотерми адсорбції апроксимували моделями Ленгмюра $A_{AD(e)} = A_{AD(L)} k_{AD(L)} C_{AD(e)} / (1 + k_{AD(L)} C_{AD(e)})$ та Фрейндліха $A_{AD(e)} = k_{AD(F)} \cdot C_{AD(e)}^{1/n}$, де $A_{AD(L)}$ – ємність насиченого моношару адсорбата; $k_{AD(L)}$ – константа Ленгмюра, $k_{AD(F)}$ та n – константи Фрейндліха (Al-Ghouti, 2020). Також розраховано питому адсорбційну ємність $A_{AD(S)} = 1000 \times A_{AD(L)} / S$ (мкмоль/м²), яка пропорційна поверхневій концентрації адсорбційних центрів (АЦ).

Характеристики пористої структури ВА наведено в табл. 1. Параметри ВА(А) та ВА(АТ) дуже близькі. Ці зразки є мікропористими з часткою об'єму мікропор $\geq 86,3$ %, які забезпечують $\geq 99,1$ % усієї питомої площі поверхні. Практично усі мікропори є супермікропорами (0,7–2,0 нм), частка ультрамікропор мала (≤ 1 %). Але загальна питома поверхня є невеликою ($S \leq 318$ м²/г), тобто пористість цих ВА розвинена погано.

Матеріал ВА(НА) має найбільшу пористість ($V_t = 1,418$ см³/г) та розвиненішу поверхню ($S = 1995$ м²/г), яка на 91 % складається

з поверхні мікропор включаючи 28 % поверхні ультрамікропор. Мезо- і макропори складають велику частку загального об'єму пор (45,6 %), але їх внесок у питому поверхню малий (≤ 9 %). У зразка ВА(НАТ) з термолізованого нітрату антрациту усі характеристики пористості є гіршими, а характеристики ультрамікропористості ($D \leq 0,7$ нм) є кращими (табл. 1). Тобто, проведення інтеркалювання та активації трансформує антрацит в адсорбент із найбільшою питомою поверхнею та великою часткою ультрамікропор (27,9 %). Додатковий тепловий удар НА знижує загальну поверхню (в 1,36 рази), но підвищує поверхню ультрамікропор (з 556 м²/г до 804 м²/г) та її частку до 54,8 %. Такий адсорбент можна назвати ультрамікропористим.

Кінетичні криві (рис. 1) показують, що адсорбційна рівновага досягається за 2–4 год залежно від адсорбату. Модель псевдо-першого порядку погано підходить для опису кінетики ($R^2 = 0,790$ – $0,910$). Модель псевдо-другого порядку ($R^2 \geq 0,996$) апроксимує криві краще (суцільні лінії на рис. 1). Вона стверджує, що швидкість адсорбції лімітується взаємодією адсорбату з поверхневими АЦ (Revellame, 2020), а не дифузією в пористу систему. Лінеаризація в координатах « $(\tau/A_{AD}) - \tau$ » (τ – час адсорбції) дозволяє розрахувати рівноважні адсорбційні ємності $A_{AD(e)}$ та константи k_2 (табл. 2). Кінетика адсорбції зразками ВА(А) та ВА(АТ) є однаковою у межах помилок вимірів, що викликано майже однаковими параметрами пористої структури (табл. 1). З цієї причини

кінетичні криві адсорбції ВА(А) не наведено, а порівняння адсорбційних властивостей проведено з матеріалом ВА(АТ).

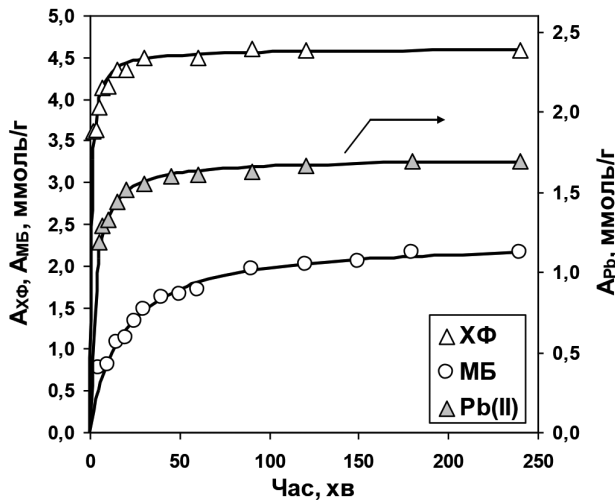


Рис. 1. Кінетика адсорбції хлорфенолу, метиленового блакитного та катіонів свинцю адсорбентом ВА(НА) ($C_{AD(0)} = 5$ ммоль/л)

Таблиця 2

Параметри моделі псевдо-другого порядку для адсорбції матеріалами ВА(НА), ВА(НАТ) та ВА(АТ) при $C_{AD(0)} = 5$ ммоль/л

Адсорбент	Параметр	Адсорбат		
		ХФ	МБ	Рб(II)
ВА(НА)	$A_{AD(e)}$, ммоль/г	4,600	2,319	1,708
	k_2 , г/ммоль·хв	0,266	0,024	0,202
	$R_{AD(0)}$, ммоль/г·хв	5,63	0,13	0,59
	$A_{AD(S)}$, мкмоль/м ²	2,30	1,08	0,85
ВА(НАТ)	$A_{AD(e)}$, ммоль/г	3,403	1,659	1,074
	k_2 , г/ммоль·хв	0,406	0,035	0,317
	$R_{AD(0)}$, ммоль/г·хв	4,71	0,10	0,37
	$A_{AD(S)}$, мкмоль/м ²	2,32	1,14	0,73
ВА(АТ)	$A_{AD(e)}$, ммоль/г	0,768	0,280	0,213
	k_2 , г/ммоль·хв	0,612	0,180	1,323
	$R_{AD(0)}$, ммоль/г·хв	0,36	0,014	0,06
	$A_{AD(S)}$, мкмоль/м ²	2,47	0,90	0,68

Найбільші ємності виявляються при поглинанні ХФ (табл. 2), а адсорбційна активність кожного ВА зменшується в ряді $ХФ < МБ < Рб(II)$. Судячи з величин питомої ємності $A_{AD(S)}$, поверхнева концентрація АЦ різних адсорбентів варіюється у досить вузьких межах: значення $A_{ХФ(S)}$ відрізняються на 7 %, $A_{МБ(S)}$ – на 21 %, $A_{Рб(S)}$ – на 20 %. Якщо питому поверхню ВА(АТ) прийняти за 1, то співвідношення питомих поверхонь у ряді

зразків ВА(АТ) – ВА(НА) – ВА(НАТ) передаватиметься рядом $1 < 4,72 < 6,41$. Аналогічна операція нормування для ємностей за обраними адсорбатами дає такі ряди: $1 < 4,43 < 5,99$ для ХФ; $1 < 5,93 < 8,28$ для МБ та $1 < 5,04 < 8,02$ для катіонів Рб(II). Тобто величина питомої поверхні є головним чинником, який визначає рівноважну адсорбційну ємність. Але пропорційність змін ємності та питомої поверхні при переході від зразка до зразка не витримується. Значення констант k_2 для різних адсорбатів сильно відрізняються: в 11,0 разів для зразка ВА(НА), в 11,7 рази для ВА(НАТ) та у 7,4 рази для ВА(АТ). Початкові швидкості $R_{AD(0)}$ відрізняються ще більше: у 43,3 рази для зразка ВА(НА), у 47,1 рази для ВА(НАТ) та у 25,7 рази для ВА(АТ).

Застосування моделі внутрішньочасткової дифузії показує, що залежності A_{AD} від $\tau_{0,5}$ мають дві ділянки (рис. 2), які апроксимуються лінійними рівняннями з коефіцієнтами в табл. 3. У спрощеному варіанті ця модель передбачає наступне: 1) якщо дифузія всередину часток адсорбенту є швидкістю визначальною стадією, то залежність адсорбційної ємності A_{AD} від $\tau_{0,5}$ проходить через початок координат і величина $Cd1 = 0$; 2) наявність декількох лінійних ділянок свідчить про різні механізми адсорбції (Wang, 2022).

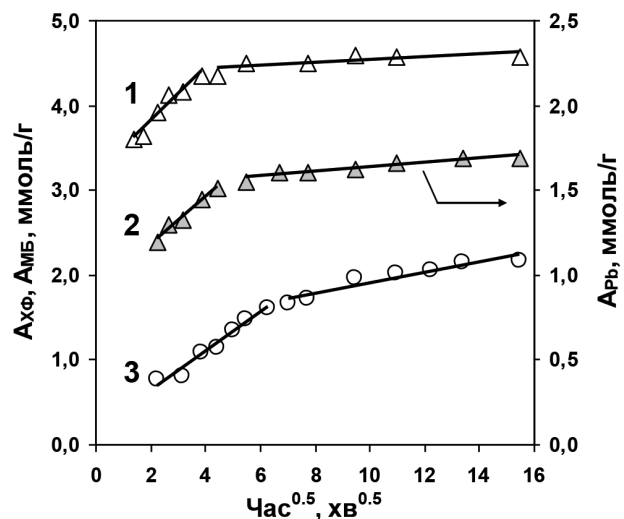


Рис. 2. Застосування моделі внутрішньочасткової дифузії для адсорбції зразком ВА(НА): 1 – ХФ, 2 – Рб(II), 3 – МБ ($C_{AD(0)} = 5$ ммоль/л)

Для зразків АВ(НА) та АВ(НАТ) перші ділянки залежностей A_{AD} від $\tau^{0,5}$ не проходять

Таблиця 3

Параметри моделі внутрішньочасткової дифузії для адсорбції зразками ВА(НА), ВА(НАТ) та ВА(АТ) при $C_{ад(0)} = 5$ ммоль/л

Адсорбат	Параметри					
	k_{d1} , ммоль/г · хв ^{0,5}	k_{d2} , ммоль/г · хв ^{0,5}	C_{d1} , ммоль/г	C_{d2} , ммоль/г	R^2_{d1}	R^2_{d2}
Зразок ВА(НА)						
ХФ	0,322	0,017	3,158	4,362	0,945	0,593
МБ	0,227	0,062	0,181	1,274	0,962	0,897
Рb(II)	0,137	0,014	0,903	1,499	0,980	0,906
Зразок ВА(НАТ)						
ХФ	0,246	0,015	2,340	3,252	0,977	0,660
МБ	0,148	0,047	0,198	0,890	0,978	0,921
Рb(II)	0,092	0,0129	0,552	0,911	0,970	0,941
Зразок ВА(АТ)						
ХФ	0,089	0,006	0,379	0,680	0,875	0,814
МБ	0,033	0,007	-0,009	0,160	0,965	0,802
Рb(II)	0,033	0,002	0,0474	0,188	0,652	0,195

через початок координат ($C_{d1} > 0$), що дозволяє припустити відсутність дифузійних обмежень у початковий період адсорбції. Цьому сприяє розвинена система мезо- та макропор (табл. 1), яка забезпечує близько половини загального об'єму пор та виконує функції безбар'єрних транспортних каналів. Інша ситуація спостерігається для зразка ВА(АТ), у якому мезопориста структура розвинена погано і забезпечує не більше 13 % об'єму пор (табл. 1). Для адсорбції МБ величина C_{d1} дорівнює нулю (в межах похибки), отже швидкість поглинання цього барвника найімовірніше лімітується дифузією.

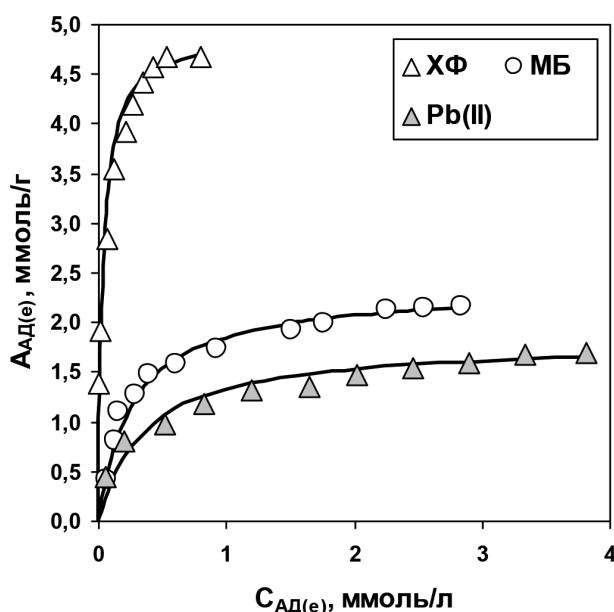


Рис. 3. Ізотерми адсорбції ХФ, МБ та Рb(II) зразком ВА(НА)

Порівняно з іншими адсорбатами молекули МБ мають значно більші розміри ($1,43 \times 0,61$ нм) (Chalil Oglou, 2023), що ускладнює їх транспортування в пористу систему. Для інших адсорбатів такі транспортні обмеження відсутні.

Ізотерми адсорбції матеріалом ВА(НА) наведено на рис. 3. Ізотерми інших ВА мають аналогічні форми і відрізняються лише кількісно. Для їх апроксимації застосовано рівняння Ленгмюра та Фрейндліха, а з їхніх лінеаризованих форм розраховано значення коефіцієнтів (табл. 4).

Модель Ленгмюра стверджує, що поверхня ВА є хімічно однорідною і максимальна адсорбційна ємність відповідає насиченому моношару адсорбату $A_{ад(L)}$. Модель Фрейндліха передбачає багатошарову адсорбцію на хімічно неоднорідній поверхні, яка містить різні за активністю адсорбційні центри. Коефіцієнт $1/n$ враховує неоднорідність поверхні та за умови $0 < 1/n < 1$ адсорбція сприятлива, а при $1/n > 1$ процес адсорбції не вигідний (Al-Ghouti, 2020). Судячи з коефіцієнтів детермінації (табл. 4), модель Ленгмюра апроксимує ізотерми краще.

Найбільші ємності $A_{ад(L)}$ за всіма адсорбатами показує матеріал ВА(НА). Зразок ВА(НАТ) має менші, але досить великі ємності. Зразки ВА(А) та ВА(АТ) виявляють найменшу адсорбційну здатність і мало відрізняються один від одного (табл. 4). Величини $A_{ад(L)}$ для різних адсорбатів розрізняються у 2,3–3,6 рази і для кожного зі зразків ВА зростають у ряді $Pb(II) < МБ < ХФ$. Тобто антрацитові ВА найактивніші по

Таблиця 4

Параметри моделей ізотерм адсорбції антрацитовими адсорбентами

Зразок	Модель	Параметр	Адсорбат		
			ХФ	МБ	Pb(II)
BA(A)	Ленгмюра	$A_{AD(L)}$, ммоль/г	0,77	0,29	0,24
		$A_{AD(S)}$, мкмоль/м ²	2,42	0,92	0,75
		$k_{AD(L)}$, л/ммоль	3,07	2,68	2,50
		R^2	0,965	0,986	0,989
	Фрейндліха	$k_{AD(F)}$, (ммоль/г)(л/ммоль) ^{1/n}	0,54	0,21	0,17
		1/n	0,241	0,409	0,340
BA(AT)	Ленгмюра	$A_{AD(L)}$, ммоль/г	0,81	0,28	0,23
		$A_{AD(S)}$, мкмоль/м ²	2,60	0,91	0,72
		$k_{AD(L)}$, л/ммоль	2,81	2,96	2,97
		R^2	0,987	0,994	0,991
	Фрейндліха	$k_{AD(F)}$, (ммоль/г)(л/ммоль) ^{1/n}	0,56	0,21	0,16
		1/n	0,228	0,436	0,321
BA(НА)	Ленгмюра	$A_{AD(L)}$, ммоль/г	4,90	2,34	1,80
		$A_{AD(S)}$, мкмоль/м ²	2,46	1,17	0,90
		$k_{AD(L)}$, л/ммоль	27,63	3,72	2,76
		R^2	0,995	0,998	0,991
	Фрейндліха	$k_{AD(F)}$, (ммоль/г)(л/ммоль) ^{1/n}	5,88	1,17	1,19
		1/n	0,271	0,364	0,294
BA(НАТ)	Ленгмюра	$A_{AD(L)}$, ммоль/г	3,68	1,83	1,19
		$A_{AD(S)}$, мкмоль/м ²	2,50	1,25	0,81
		$k_{AD(L)}$, л/ммоль	8,16	1,71	1,92
		R^2	0,998	0,998	0,991
	Фрейндліха	$k_{AD(F)}$, (ммоль/г)(л/ммоль) ^{1/n}	3,28	1,04	0,72
		1/n	0,267	0,433	0,309
		R^2	0,919	0,931	0,979

відношенню до 4-хлорфенолу з найбільшою ємністю ($A_{X\Phi(L)} = 4,90$ ммоль/г) у матеріала BA(НА). Виміряні значення $A_{AD(L)}$ є досить великими. Зазвичай ємність за хлорфенолом різних вуглецевих матеріалів знаходиться в межах 0,33–2,52 ммоль/г (Garba, 2019; Chen, 2017), за катіонами Pb(II) – в межах 0,029–1,42 ммоль/г (Ghorbani, 2020). Більшість адсорбентів метиленового блакитного мають ємність в інтервалі 0,021–2,58 ммоль/г (Oladoye, 2022; Jasri, 2023), але повідомлено про $A_{MB(L)} = 9,43$ ммоль/г (Wang, 2024) і навіть $A_{MB(L)} = 13,07$ ммоль/г у матеріала з біомаси, активованого КОН ($R_{\text{КОН}} = 4$ г/г) (Liu, 2020).

Константи $k_{AD(L)}$ для зразків BA(A) та BA(AT) близькі та мало залежать від адсорбату. Величини $k_{AD(L)}$ при адсорбції зразком BA(НА) розрізняються в 10 разів з найбільшим значенням

для ХФ ($k_{X\Phi(L)} = 27,63$ л/ммоль). Тобто адсорбційна здатність адсорбенту BA(НА) з нітрату антрациту найбільш чутлива до природи адсорбату. Для зразка BA(НАТ) цей ефект виражений слабше: величини констант $k_{AD(L)}$ для різних сполук відрізняються у 4,8 рази. Питомі адсорбційні ємності за хлорфенолом $A_{X\Phi(S)}$ для всіх ВА близькі та знаходяться в межах $A_{X\Phi(S)} = 2,42$ – $2,60$ мкмоль/м². Тобто незалежно від прекурсора лужна активація створює приблизно однакову концентрацію поверхневих АЦ, активних по відношенню до ХФ. Аналогічна ситуація спостерігається для МБ та катіонів свинцю (табл. 4), але величини $A_{MB(S)}$ та $A_{Pb(S)}$ значно менші: $A_{MB(S)} = 0,92$ – $1,25$ мкмоль/м² та $A_{Pb(S)} = 0,72$ – $0,90$ мкмоль/м². Бачимо, що збільшення поверхні при активації супроводжується еквівалентним зростанням загального числа

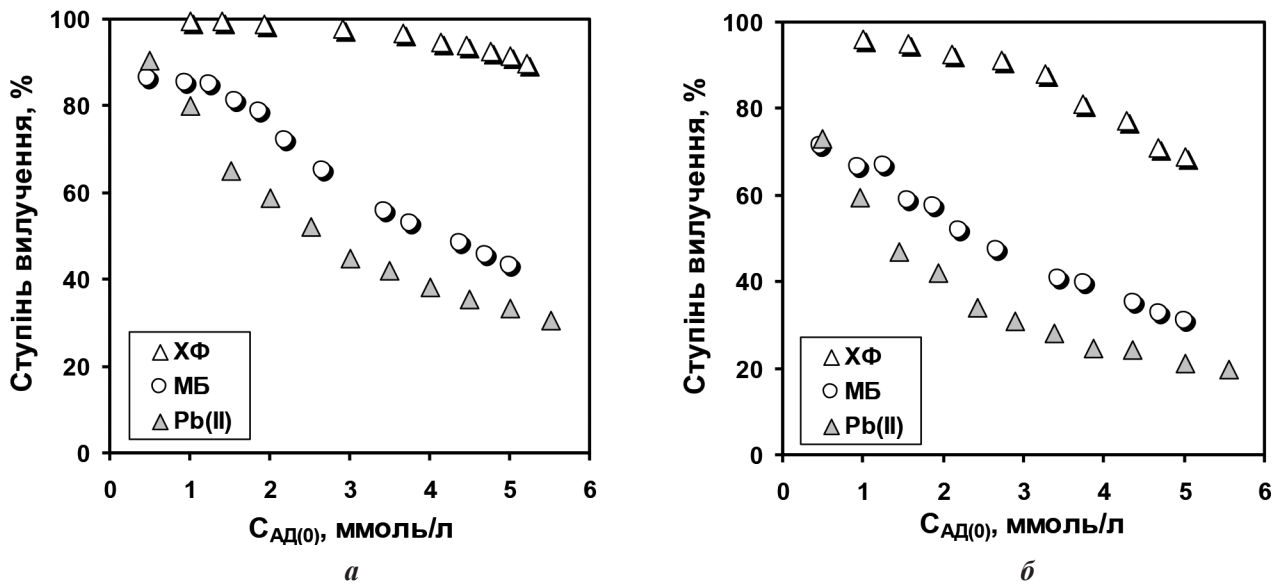


Рис. 4. Ступінь вилучення адсорбатів ХФ, МБ та Рb(II): а – ВА(НА), б – ВА(НАТ)

АЦ, але поверхнева концентрація АЦ майже не змінюється. Найімовірніше, це викликано тим, що КОН як пороутворювач нівелює стартові відмінності структур прекурсорів у прийнятих умовах лужної активації.

Порівняння отриманих та опублікованих даних показує, що тільки зразки ВА(НА) та ВА(НАТ) мають досить високі адсорбційні ємності за всіма адсорбатами і саме їх додатково протестовано для вилучення екотоксикантів з водних розчинів. Залежності ступеня вилучення (СВ) адсорбатів від їх початкових концентрацій наведено на рис. 4. Ці значення СВ отримані за час адсорбції 4 год, що є часом досягнення адсорбційної рівноваги.

Ступінь вилучення підвищується зі зменшенням початкової концентрації, причому ВА(НА) показує найвищий. Найбільші СВ спостерігаються при адсорбції ХФ: 99,7 % для ВА(НА) та 96,0 % для ВА(НАТ). Величини СВ при адсорбції МБ помітно менші, а для Рb(II) ще нижчі. Важливо, що при $C_{Ad(0)} \leq 1$ ммоль/л значення СВ для МБ та Рb(II) майже зрівнюються і становлять близько 90 % для ВА(НА) та 70 % для ВА(НАТ). Для оцінки швидкості вилучення сполук з водних розчинів адсорбційні вимірювання доповнено кінетикою адсорбції при зменшеній початковій концентрації $C_{Ad(0)} = 1$ ммоль/л (табл. 5).

Зіставлення значень $R_{Ad(0)}$ для різних адсорбатів показує, що найбільша початкова

Таблиця 5

Кінетичні параметри адсорбції матеріалами ВА(НА) та ВА(НАТ) при початкових концентраціях 1 ммоль/л та 5 ммоль/л

Адсорбат	Параметр	ВА(НА)		ВА(НАТ)	
	$C_{Ad(0)}$, ммоль/л	1	5	1	5
ХФ	$A_{XФ(e)}$, ммоль/г	0,988	4,600	0,956	3,403
	$R_{XФ(0)}$, ммоль/г · хв	1,03	5,63	0,73	4,71
	$A_{XФ(1)}$, ммоль/г	0,507	2,532	0,413	1,975
	$P = A_{XФ(1)} / A_{XФ(e)}$, %	50,7	50,6	41,3	39,5
МБ	$A_{МБ(e)}$, ммоль/г	0,911	2,319	0,699	1,659
	$R_{МБ(0)}$, ммоль/г · хв	0,054	0,130	0,049	0,096
	$A_{МБ(1)}$, ммоль/г	0,051	0,124	0,046	0,090
	$P = A_{МБ(1)} / A_{МБ(e)}$, %	5,1	2,5	4,6	1,8
Рb(II)	$A_{Рb(e)}$, ммоль/г	0,811	1,708	0,589	1,074
	$R_{Рb(0)}$, ммоль/г · хв	0,282	0,59	0,215	0,366
	$A_{Рb(1)}$, ммоль/г	0,209	0,439	0,158	0,273
	$P = A_{Рb(1)} / A_{Рb(e)}$, %	20,9	8,8	15,8	5,5

швидкість вилучення спостерігається для ХФ. Швидкість поглинання катіонів свинцю нижче в 3,4–12,9 разів залежно від умов адсорбції. Найменшу швидкість вилучення зареєстровано при адсорбції МБ, яка в 14,9–49,1 рази менша за швидкість поглинання ХФ. Уявлення про кількість адсорбату, яка поглинається зразками ВА в початковий період адсорбції, дає параметр $A_{AD(1)}$ (табл. 5), який вперше запропоновано в роботі (Wu, 2011). Відповідно, співвідношення $P = A_{AD(1)} / A_{AD(e)}$ показує ефективність вилучення адсорбатів у початковий період (табл. 5). Мінімальна ефективність спостерігається для МБ (1,8–4,6 % від величин $A_{MB(e)}$), середня – для Рb(II) ($P \leq 21$ %), а максимальна – при адсорбції ХФ. За першу хвилину процесу зразок ВА(НАТ) поглинає 40–41 %, а зразок ВА(НА) близько 51 % максимальної кількості адсорбованого 4-хлорфенолу. При зменшенні початкової концентрації з 5 ммоль/л до 1 ммоль/л (табл. 5) ефективність адсорбентів при вилученні ХФ майже не змінюється, при поглинанні МБ збільшується в 2,0–2,5 раза, а при поглинанні свинцю збільшується в 2,4–3,4 рази. Тобто, антрацитові адсорбенти виявляють високу швидкість вилучення при невеликих концентраціях екотоксикантів, що важливо для термінового очищення води.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Вперше досліджено адсорбційні властивості антрацитових нанопористих адсорбентів, отриманих через утворення нітрату антрациту інтеркалюванням азотної кислоти та наступні тепловий удар і лужну активацію при невеликому співвідношенні КОН/антрацит (1 г/г). Встановлено, що лужна активація (800 °C) перетворює нітрат антрациту в адсорбент з розвинутою поверхнею (~2000 м²/г), яка на 91 % складається з поверхні мікропор включаючи 28 % поверхні ультрамікропор. Мезо- і макропори складають велику частку загального об'єму пор (45,6 %), але їх внесок у питому поверхню малий (≤ 9 %). Тепловий удар (800 °C) з наступною лужною активацією перетворює нітрат антрациту в адсорбент з питомою поверхнею ~1500 м²/г та підвищеною часткою ультрамікропор (~55 %).

Кінетика адсорбції 4-хлорфенолу (ХФ), барвника метиленового блакитного (МБ) та катіонів Рb(II) підпорядковується рівнянню псевдо-другого порядку, а розраховані з нього початкові швидкості збільшуються в ряду адсорбатів $МБ < Рb(II) < ХФ$ та за величиною різняться у 49 разів. Ізотерми адсорбції апроксимуються моделлю Ленгмюра краще ніж моделлю Фрейндліха. Ємності насичених шарів адсорбатів є найбільшими у адсорбенту з нітрату антрациту, підвищуються в ряді $Рb(II) < МБ < ХФ$ та становлять 1,80 ммоль/г, 2,34 ммоль/г та 4,90 ммоль/г, відповідно. Ступінь вилучення адсорбатів збільшується зі зменшенням їх концентрації у воді та досягає 99,7 % для ХФ та 90 % для МБ та катіонів Рb(II). Ефективність вилучення сполук антрацитовими адсорбентами за першу хвилину адсорбції складає $\leq 4,6$ % для МБ, $\leq 20,9$ % для $\leq 4,6$ % для Рb(II) та $\leq 50,7$ % для ХФ.

З точки зору найбільш значущих властивостей адсорбенту (великої адсорбційної ємності та високої швидкості адсорбції) отримані антрацитові матеріали найактивніші при очищенні води від хлорфенолу. Швидкість вилучення барвника та катіонів свинцю менша, але адсорбційна ємність за цими сполуками досить велика, хоча досягається за більш тривалий час адсорбції. Тобто, нанопористі матеріали з нітрату антрациту є ефективними адсорбентами для очищення водних середовищ від катіонів важких металів, барвників та фенольних сполук. Завдяки розвиненій субнанопористості антрацитові адсорбенти можуть бути використані в пристроях зберігання водню або природного газу, а також електроенергії в суперконденсаторах-іоністорах. На вивчення цього будуть спрямовані подальші дослідження.

Подяка. Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку, надану Національною академією наук України (Державний реєстраційний номер: 0117U000022). Ми також дякуємо доктору R.D. Mysyk (Basque Research and Technology Alliance, Spain) за допомогу у проведенні адсорбційних вимірювань та розрахунків ізотерм низькотемпературної адсорбції азоту.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Wei F., Zhang H., He X., Ma H., Dong S., Xie X. Synthesis of porous carbons from coal tar pitch for high-performance supercapacitors. *New carbon materials*. 2019. V. 34(2). P. 132–139. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(19\)60006-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(19)60006-5)
2. Javed H., Luong D. X., Lee C.-G., Zhang D., Tour J. M., Alvarez P. J. J. Efficient removal of bisphenol-A by ultra-high surface area porous activated carbon derived from asphalt. *Carbon*. 2018. Vol. 140. P. 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.08.038>

3. Hamyali H., Nosratinia F., Rashidi A., Ardjmand M. Anthracite coal-derived activated carbon as an effectiveness adsorbent for superior gas adsorption and CO₂/N₂ and CO₂/CH₄ selectivity: Experimental and DFT study. *J. Environ. Chem. Eng.* 2022. Vol. 10. Is.1. Article 107007. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107007>
4. Tiwari D., Bhunia H., Bajpai P.K. Adsorption of CO₂ on KOH activated, N-enriched carbon derived from urea formaldehyde resin: kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *Appl. Surf. Sci.*, 2018. Vol. 439. P. 760–771. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.203>
5. Gayathiri M., Pulingam T., Lee K.T., Sudesh K. Activated carbon from biomass waste precursors: Factors affecting production and adsorption mechanism. *Chemosphere*, 2022. Vol.294, Article 133764. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133764>
6. Seow Y.X., Tan Y.H., Mubarak N.M., Kansedo J., Khalid M., Ibrahim M.L., Ghasemi M. A review on biochar production from different biomass wastes by recent carbonization technologies and its sustainable applications. *J. Environ. Chem. Eng.* 2022. Vol. 10. Is.1. Article 107017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107017>
7. Shi M., Xin Y., Chen X., Zou K., Jing W., Sun J., Chen Y., Liu Y. Coal-derived porous activated carbon with ultrahigh specific surface area and excellent electrochemical performance for supercapacitors. *J. Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 859. Article 157856. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157856>
8. Liu Y., Qu X., Huang G., Xing B., Fan Y., Zhang C., Cao Y. Microporous carbon derived from anthracite as supercapacitor electrodes with commercial level mass loading. *J. Energy Storage*. 2021. Vol. 43. Article 103200. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103200>
9. Ma W., Xiao R., Wang X., Lv X., Zhang W., Wang W., Li Y., Li M., Hou L., Gong Y., Zhang Y., Chen C.-M. Chemical co-activated modified small mesoporous carbon derived from nature anthracite toward enhanced supercapacitive behaviors. *J. Electroanalytical Chem.* 2022. Vol. 917. Article 116417. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116417>
10. Lyubchik S.B., Galushko L.Ya., Rego A.M., Tamarkina Yu.V., Galushko O.L., Fonseca I.M. Intercalation as an approach to the activated carbon preparation from Ukrainian anthracites. *J. Phys. Chem. Solids*. 2004. Vol. 65. No. 2–3. P. 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2003.10.006>
11. Гаврилюк Н.А., Шевчук О.М., Приходько Г.П., Картель М.Т. Оксид графену: одержання, властивості, застосування (огляд). *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2015. Т. 6. № 4. С. 413–448. <https://doi.org/10.15407/hftp06.04.413>
12. Lee S.-Yi., Mahajan R.L. A facile method for coal to graphene oxide and its application to a biosensor. *Carbon*. 2021. Vol. 181. P. 408–420. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.05.007>
13. Сапунов В.А., Рудаков Е.С., Гагарина С.И., Кучеренко В.А. Окисление угля парами азотной кислоты. *Укр. хим. ж.* 1986. Т. 52. № 8. С. 832–835.
14. Кучеренко В.О., Тамаркіна Ю.В., Попов А.Ф. Лужна активація з тепловим ударом – новий спосіб отримання нанопоруватих вуглецевих адсорбентів. *Доп. НАН України*. 2016. № 12, С. 74–81. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2016.12.074>
15. Jagiello J., Olivier J.P. 2D-NLDFT adsorption models for carbon slit-shaped pores with surface energetical heterogeneity and geometrical corrugation. *Carbon*. 2013. Vol. 55. P. 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.12.011>
16. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* 2015. Vol. 87. Is. 9–10. P. 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
17. Garba Z.N., Zhou W., Lawan I., Xiao W., Zhang M., Wang L., Chen L., Yuan Z. An overview of chlorophenols as contaminants and their removal from wastewater by adsorption: A review. *J. Environ. Manage.* 2019. Vol. 241. P. 59–75. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.004>
18. Ghorbani M., Seyedin O., Aghamohammadhassan M. Adsorptive removal of lead (II) ion from water and wastewater media using carbon-based nanomaterials as unique sorbents: A review. *J. Environ. Manage.* 2020. Vol. 254. Article 109814. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109814>
19. Oladoye P.O., Ajiboye T.O., Omotola E.O., Oyewola O.J. Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*. 2022. Vol. 16. Article 100678. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>
20. Revellame E.D., Fortela D.L., Sharp W., Zappi M.E. Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Eng. Technol.* 2020. Vol. 1. Article 100032. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>
21. Wang J., Guo X. Rethinking of the intraparticle diffusion adsorption kinetics model: Interpretation, solving methods and applications. *Chemosphere*. 2022. Vol. 309. Article 136732. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136732>
22. Al-Ghouti M.A., Da'ana D.A. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *J. Hazardous Materials*. 2020. Vol. 393. Article 122383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>

23. Chalil Oglou R, Gokce Y., Yagmur R., Aktas Z. Production of demineralised high quality hierarchical activated carbon from lignite and determination of adsorption performance using methylene blue and p-nitrophenol: The role of surface functionality, accessible pore size and surface area. *J. Environ. Manage.* 2023. Vol.345. Article 118812. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118812>
24. Chen C., Geng X., Huang W.A. Adsorption of 4-chlorophenol and aniline by nanosized activated carbons. *Chem. Eng. J.* 2017. Vol. 327. P. 941–952. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.06.183>
25. Jasri K., Abdulhameed A.S., Jawad A.H., Al Othman Z.A., Yousef T.A., Al Duaij O.K. Mesoporous activated carbon produced from mixed wastes of oil palm frond and palm kernel shell using microwave radiation-assisted K_2CO_3 activation for methylene blue dye removal: Optimization by response surface methodology. *Diamond and Related Materials.* 2023. Vol. 131. Article 109581. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109581>
26. Wang Q., Mu J. Baking-inspired pore regulation strategy towards a hierarchically porous carbon for ultra-high efficiency cationic/anionic dyes adsorption. *Bioresource Technology.* 2024. Vol.395. 2024. Article 130324. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130324>
27. Liu G., Qiu L., Deng H., Wang J., Yao L., Deng L. Ultrahigh surface area carbon nanosheets derived from lotus leaf with super capacities for capacitive deionization and dye adsorption. *Appl. Surf. Sci.* 2020. Vol. 524. Article 146485. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146485>
28. Wu F.-C., Wu P.-H., Tseng R.-L., Juang R.-S. Preparation of novel activated carbons from H_2SO_4 -pretreated corncob hulls with KOH activation for quick adsorption of dye and 4-chlorophenol. *J. Environ. Manage.* 2011. Vol. 92. Is. 3. P. 708–713. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.003>

REFERENCES:

1. Wei, F., Zhang, H., He, X., Ma, H., Dong, S., & Xie, X. (2019). Synthesis of porous carbons from coal tar pitch for high-performance supercapacitors. *New carbon materials*, 34(2), 132–139. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(19\)60006-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(19)60006-5)
2. Javed, H., Luong, D. X., Lee, C.-G., Zhang, D., Tour, J. M., & Alvarez, P. J. J. (2018). Efficient removal of bisphenol-A by ultra-high surface area porous activated carbon derived from asphalt. *Carbon*, 140, 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.08.038>
3. Hamyali, H., Nosratinia, F., Rashidi, A., & Ardjmand, M. (2022). Anthracite coal-derived activated carbon as an effectiveness adsorbent for superior gas adsorption and CO_2/N_2 and CO_2/CH_4 selectivity: Experimental and DFT study. *J. Environ. Chem. Eng.*, 10(1), 107007. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107007>
4. Tiwari, D., Bhunia, H., & Bajpai, P. K. (2018). Adsorption of CO_2 on KOH activated, N-enriched carbon derived from urea formaldehyde resin: kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *Appl. Surf. Sci.*, 439, 760–771. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.203>
5. Gayathiri, M., Pulingam, T., Lee, K. T., & Sudesh, K. (2022). Activated carbon from biomass waste precursors: Factors affecting production and adsorption mechanism. *Chemosphere*, 294, 133764. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133764>
6. Seow, Y. X., Tan, Y. H., Mubarak, N. M., Kansedo, J., Khalid, M., Ibrahim, M. L., & Ghasemi, M. (2022). A review on biochar production from different biomass wastes by recent carbonization technologies and its sustainable applications. *J. Environ. Chem. Eng.*, 10(1), 107017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107017>
7. Shi, M., Xin, Y., Chen, X., Zou, K., Jing, W., Sun, J., Chen, Y., & Liu, Y. (2021). Coal-derived porous activated carbon with ultrahigh specific surface area and excellent electrochemical performance for supercapacitors. *J. Alloys and Compounds*, 859, 157856. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157856>
8. Liu, Y., Qu, X., Huang, G., Xing, B., Fan, Y., Zhang, C., & Cao, Y. (2021). Microporous carbon derived from anthracite as supercapacitor electrodes with commercial level mass loading. *J. Energy Storage*, 43, 103200. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103200>
9. Ma, W., Xiao, R., Wang, X., Lv, X., Zhang, W., Wang, W., Li, Y., Li, M., Hou, L., Gong, Y., Zhang, Y., & Chen C.-M. (2022). Chemical co-activated modified small mesoporous carbon derived from nature anthracite toward enhanced supercapacitive behaviors. *J. Electroanalytical Chem.*, 917, 116417. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116417>
10. Lyubchik, S. B., Galushko, L. Ya., Rego, A. M., Tamarkina, Yu. V., Galushko, O. L., & Fonseca, I. M. (2004). Intercalation as an approach to the activated carbon preparation from Ukrainian anthracites. *J. Phys. Chem. Solids*, 65(2–3), 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2003.10.006>
11. Havryliuk, N. A., Shevchuk, O. M., Pryhodko, H. P., & Kartel, M. T. Oksyd grafenu: oderzhannia, vlastyvoli, zastosuvannia (ohliad) [Grapheneoxide: preparation, properties, applications (review)]. *Himia, fizika ta tehnologia poverhni – Chemistry, Physics and Technology of Surface*, 6(4), 413–448 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/hftp06.04.413>
12. Lee, S.-Yi., & Mahajan, R. L. (2021). A facile method for coal to graphene oxide and its application to a biosensor. *Carbon*, 181, 408–420. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.05.007>

13. Sapunov, V.A., Rudakov, E.S., Naharynova, S.Y., Kucherenko, V.A. (1986). Okyslenye uhlia paramy azotnoi kysloty [Oxidation of coal with nitric acid vapors]. *Ukr. Chim. J.- Ukrainian Chemical Journal*, 52(8), 832–835.
14. Kucherenko, V.A. Tamarkina, Ju. V., & Popov, A. F. (2016). Luzhna aktyvatsiia z teplovym udarom – novyi sposib otrymanna nanoporuvatykh vuhletsevykh adsorbentiv [Alkaline activation with thermal shock – a new method for obtaining nanoporous carbon adsorbents]. *Dopovidi NAN Ukrainy – Reports of the NAS of Ukraine*, 12, 74–81. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2016.12.074>
15. Jagiello, J., & Olivier, J.P. (2013). 2D-NLDFT adsorption models for carbon slit-shaped pores with surface energetical heterogeneity and geometrical corrugation. *Carbon*, 55, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.12.011>
16. Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases. with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
17. Garba, Z.N., Zhou, W., Lawan, I., Xiao, W., Zhang, M., Wang, L., Chen, L., & Yuan, Z. (2019). An overview of chlorophenols as contaminants and their removal from wastewater by adsorption: A review. *J. Environ. Manage.*, 241, 59–75. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.004>
18. Ghorbani, M., Seyedin, O., & Aghamohammadhassan, M. (2020). Adsorptive removal of lead (II) ion from water and wastewater media using carbon-based nanomaterials as unique sorbents: A review. *J. Environ. Manage.*, 254, 109814. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109814>
19. Oladoye, P.O., Ajiboye, T.O., Omotola, E.O., & Oyewola, O.J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering.*, 16, 100678. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>
20. Revellame, E.D., Fortela, D.L., Sharp, W., & Zappi, M.E. (2020). Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Eng. Technol.*, 1, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>
21. Wang, J., & Guo, X. (2022). Rethinking of the intraparticle diffusion adsorption kinetics model: Interpretation. solving methods and applications. *Chemosphere*, 309, 136732. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136732>
22. Al-Ghouti, M.A., & Da'ana, D.A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *J. Hazardous Materials.*, 393, 122383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
23. Chalil Oglou, R, Gokce, Y., Yagmur, R., & Aktas, Z. (2023). Production of demineralised high quality hierarchical activated carbon from lignite and determination of adsorption performance using methylene blue and p-nitrophenol: The role of surface functionality, accessible pore size and surface area. *J. Environ. Manage.*, 345, 118812. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118812>
24. Chen, C., Geng, X., & Huang, W.A. (2017). Adsorption of 4-chlorophenol and aniline by nanosized activated carbons. *Chem. Eng. J.*, 327, 941–952. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.06.183>
25. Jasri, K., Abdulhameed, A. S., Jawad, A. H., Al Othman, Z. A., Yousef, T. A., & Al Duaij, O. K. (2023). Mesoporous activated carbon produced from mixed wastes of oil palm frond and palm kernel shell using microwave radiation-assisted K₂CO₃ activation for methylene blue dye removal: Optimization by response surface methodology. *Diamond and Related Materials*, 131, 109581. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109581>.
26. Wang, Q., & Mu, J. (2024). Baking-inspired pore regulation strategy towards a hierarchically porous carbon for ultra-high efficiency cationic/anionic dyes adsorption. *Bioresource Technology*, 395, 130324. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130324>
27. Liu, G., Qiu, L., Deng, H., Wang, J., Yao, L., & Deng, L. (2020). Ultrahigh surface area carbon nanosheets derived from lotus leaf with super capacities for capacitive deionization and dye adsorption. *Appl. Surf. Sci.*, 524, 146485. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146485>
28. Wu, F.-C., Wu, P.-H., Tseng, R.-L., & Juang, R.-S. (2011). Preparation of novel activated carbons from H₂SO₄-pretreated corncob hulls with KOH activation for quick adsorption of dye and 4-chlorophenol. *J. Environ. Manage.*, 92(3), 708–713. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.003>

УДК 504.064:625.7:534.6

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-10>

Зоряна ЛАВРИНЮК

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

ORCID: 0000-0002-1906-3330

Ольга КАРАЇМ

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

ORCID: 0000-0002-1722-4110

Віра ДУБЕНСЬКА

магістр, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Бібліографічний опис статті: Лавринюк, З., Караїм, О., Дубенська, В. (2025). Оцінка шумового навантаження від автотранспорту на вулиці Винниченка міста Луцьк. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 77–82, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-10>

ОЦІНКА ШУМОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД АВТОТРАНСПОРТУ НА ВУЛИЦІ ВИННИЧЕНКА МІСТА ЛУЦЬК

Однією із актуальних екологічних проблем урбанізованих територій є шумове навантаження, яке щорічно зростає, відповідно до збільшення кількості автомобільного транспорту на вулицях. Це негативно впливає, як на здоров'я людей, так і на якість життя в цілому. В Україні, зокрема в містах обласного рівня, показники шумового забруднення часто перевищують гігієнічні нормативи. Місто Луцьк не є винятком, а одним із найбільш шумних районів тут вважається вулиця Винниченка, яка має велику інтенсивність руху автотранспорту, оскільки розташована у центрі міста. Уздовж вулиці Винниченка розмішені корпуси ВНУ імені Лесі Українки та житлові будинки, тому дослідження рівня її шумового навантаження є надзвичайно актуальним та важливим.

Метою роботи є оцінка рівня шумового навантаження, спричиненого автомобільним транспортом на вулиці Винниченка міста Луцьк. Аналіз інтенсивності шуму в різні пори року, а також порівняння отриманих результатів із гігієнічними нормами, встановленими для житлових зон.

Дослідження проведено у період осені та зими 2023–2024 років із 17:00 по 19:00 години. Вимірювання здійснено за допомогою шумоміра Smart Sensor AR814 Digital Sound Level Meter з діапазоном 30–130 дБ та частотою 31,5 Гц – 8,5 кГц. Опрацювання результатів проводилося статистичним методом. Екологічна оцінка шумового навантаження здійснювалася порівнянням отриманих результатів із санітарними нормами допустимих рівнів шуму для відповідних територій.

За результатами дослідження виявлено перевищення допустимих рівнів шумового навантаження, особливо у точках з найбільш інтенсивним транспортним рухом. Найвищі показники шуму зафіксовані у контрольній точці, що знаходиться поблизу ЦУМу та на проспекті Мойсея. Сезонні варіації рівня шумового забруднення не надто виражені, через малу кількість зелених насаджень, які у осінній період екранують шум вулиці. Існуючі на вулиці обмеження у двосторонньому русі та заборона руху вантажним автомобілям дає позитивні результати. Окрім цього, для стабільного покращення ситуації із зменшенням негативної дії шуму потрібно проводити модернізацію дорожнього покриття. Доречним є збільшення кількості зелених насаджень уздовж вулиці Винниченка. Перспективним є розширення моніторингу шумового забруднення на інші вулиці міста Луцьк, з метою більш чіткої картини проблематики.

Ключові слова: шумове навантаження, автотранспорт, шумомір, оцінка рівня шуму, місто Луцьк.

Zoryana LAVRYNYUK

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, 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:0000-0002-1906-3330

Olha KARAIM

PhD of Economics, 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: 0000-0002-1722-4110

Vira DUBENSKA

Master, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

To cite this article: Lavrynyuk, Z., Karaim, O., Dubenska, V. (2025). Otsinka shumovoho navantazhennia vid avtotransportu na vulytsi Vynnychenka mista Lutsk [Assessment of Traffic Noise Impact on Vynnychenko Street in the City of Lutsk]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 77–82, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-10>

ASSESSMENT OF TRAFFIC NOISE IMPACT ON VYNNYCHENKO STREET IN THE CITY OF LUTSK

One of the pressing environmental issues in urbanized areas is noise pollution, which increases annually in line with the growing number of vehicles on city streets. This negatively affects both human health and overall quality of life. In Ukraine, particularly in regional cities, noise pollution levels often exceed sanitary standards. The city of Lutsk is no exception, with Vynnychenko Street being one of the noisiest areas due to its high traffic intensity, as it is located in the city center. Along Vynnychenko Street, there are buildings of Lesya Ukrainka Volyn National University and residential areas, making the study of its noise pollution levels highly relevant and important.

The aim of the study is to assess the level of noise pollution caused by road traffic on Vynnychenko Street in Lutsk. The study analyzes noise intensity during different seasons and compares the obtained results with the sanitary standards set for residential zones.

The research was conducted during the autumn and winter of 2023–2024, from 5:00 PM to 7:00 PM. Measurements were taken using the Smart Sensor AR814 Digital Sound Level Meter, with a range of 30–130 dB and a frequency range of 31.5 Hz to 8.5 kHz. Data processing was performed using statistical methods. The environmental assessment of noise pollution was carried out by comparing the obtained results with sanitary standards for permissible noise levels in respective areas.

The results of the study revealed an exceedance of permissible noise levels, especially at points with the highest traffic intensity. The highest noise levels were recorded at the control point near the Central Department Store (TsUM) and on Moisei Avenue. Seasonal variations in noise pollution levels were not very pronounced due to the limited number of green plantings, which provide noise screening effects in the autumn. Existing restrictions on two-way traffic and the prohibition of heavy vehicle movement have shown positive results. Additionally, to achieve a stable improvement in mitigating noise impact, the modernization of the road surface is necessary. Increasing the number of green spaces along Vynnychenko Street is also appropriate. Expanding noise pollution monitoring to other streets in Lutsk is a promising direction to obtain a clearer picture of the problem.

Key words: noise pollution, road traffic, sound level meter, noise level assessment, Lutsk city.

Актуальність проблеми. Шумове навантаження є однією з найбільш поширених екологічних проблем у великих містах, особливо в умовах швидкого розвитку транспортної інфраструктури. Інтенсивний автомобільний рух, характерний для центральних вулиць міста Луцьк, значно впливає на рівень шумового забруднення, що створює реальні загрози для здоров'я населення та якості життя. Вулиця

Винниченка є однією з найбільш завантажених транспортом ділянок міста, де спостерігається постійний потік автомобілів. Також шумове забруднення на даній вулиці є особливо актуальним через близькість житлових будинків, соціальних об'єктів та навчальних установ, де люди проводять значну частину часу. Перебування під дією високого рівня шуму може призвести до серйозних наслідків, таких як порушення

сну, стреси, серцево-судинні захворювання та зниження загального рівня якості життя. Тому моніторинг показників шуму є актуальним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вивчення проблеми шумового забруднення набуває все більшої актуальності як в Україні, так і в інших країнах світу. Зокрема у праці (Дорожко, 2023) досліджено шумове навантаження на прилеглі до автомобільної дороги території та засоби боротьби з ним, у роботі (Гринчишин, 2021, Шупла, 2021, Жоріна, 2021) представлено дослідження рівня шуму магістральних вулиць центральної частини міста Львів. Оцінку шумового забруднення центрального та 33 мікрорайонів міста Луцьк здійснили (Лавринюк, 2024, Караїм, 2024, Рабан, 2024, Сисоєва, 2024). Вивченням цієї проблематики займалися також зарубіжні автори (Цимпіда, 2024, Цакіріді, 2024, Нобіле, 2023, Тунг, 2023) та ін.

Незважаючи на численні дослідження, проблема шумового навантаження в Луцьку залишається не достатньо вивчена, тому проведення оцінки рівня шуму на вулиці Винниченка є важливим внеском у наукові дослідження з цієї теми.

Метою роботи є оцінка рівня шумового навантаження, спричиненого автомобільним транспортом на вулиці Винниченка міста Луцьк. Аналіз інтенсивності шуму в різні пори року, а також порівняння отриманих результатів із гігієнічними нормами, встановленими для житлових зон.

Методологія. Дослідження проведено за допомогою шумоміра Smart Sensor AR814 Digital Sound Level Meter з діапазоном вимірювання 30–130 дБ та частотним діапазоном 31,5 Гц – 8,5 кГц. Прилад для вимірювання розмішували на висоті $1,2 \pm 0,2$ м від рівня наземного покриття й на відстані $1,5 \pm 0,2$ м від межі проїжджої частини. Відстань від світлофорів, перехресть та станцій зупинок громадського транспорту становила не менше 50 м.

Результати дослідження шумового забруднення базуються на методі порівняння отриманих результатів із санітарними нормами допустимих рівнів шуму для відповідних територій (ДБН В.1.1-31:2013, 2013, Про затвердження Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови, 2019).

Інформаційну базу дослідження становили: законодавчі та нормативні акти із допустимих рівнів шумового забруднення, дані місцевих органів самоврядування щодо транспортного руху та шумового фону, а також науково-аналітичні статті, електронні джерела періодичних видань.

Виклад основного матеріалу дослідження. Зростання рівня урбанізації супроводжується збільшенням транспортного трафіку. Саме велика кількість автотранспорту на обмеженій території міста створює екологічну проблему шумового забруднення з високим рівнем навантаження.

Дослідження проводили у центральному мікрорайоні міста Луцьк уздовж вулиці Винниченка з переходом на проспект Мойсея у кількох контрольних точках (рис. 1; 2). Контрольні точки обирали відповідно до вимог: відстань від світлофорів та перехресть не менше 50 м. Вимірювання проводилися як у зимовий, так і в осінній періоди протягом 17:00–19:00, для того, щоб встановити закономірності у зміні шумових показників у різні сезони (табл. 1).

Табл. 1 містить дані про вимірювання рівня шуму в децибелах (дБ) на різних точках дослідження по вулиці Винниченка протягом осіннього та зимового періодів 2023–2024 років. Можемо констатувати, що рівень шуму біля дороги в осінній період коливається від 51,3 дБ до 80,3 дБ, а в зимовий період – від 46,7 дБ до 84,0 дБ. Підвищення рівня шумового забруднення у зимовий період є, але незначне. Це пояснюється дуже інтенсивною забудовою і обмеженою кількістю зелених насаджень, що ростуть обабіч дороги. Саме вони впливають на рівень шумового забруднення, екрануючи шум від автотранспорту восени за допомогою листяного покриву. Перевищення рівня шумового забруднення при переході на проспект Мойсея пояснюється збільшенням потоку транспортних засобів, оскільки по вулиці Винниченка існує заборона на рух вантажних автомобілів та односторонній рух для автомобільного транспорту. У першій контрольній точці теж значно відрізняються показники, що пов'язано із більшим автомобільним навантаженням на просп. Волі.

Результати графічного відображення даних дослідження подано на рис. 3.



Рис. 1. Показники рівня шумового навантаження в центральному мікрорайоні міста Луцьк уздовж вулиці Винниченка поблизу дороги в осінній період



Рис. 2. Показники рівня шумового навантаження в центральному мікрорайоні міста Луцьк уздовж вулиці Винниченка поблизу дороги у зимовий період

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами дослідження встановлено перевищення допустимих рівнів шумового навантаження, особливо у точках з інтенсивнішим транспортним рухом. Найвищі показники шуму зафіксовані у контрольній

точці, що знаходиться поблизу ЦУМу та на проспекті Мойсея. Сезонні варіації рівня шумового забруднення не надто виражені, через малу кількість зелених насаджень. Запропоновані обмеження у двосторонньому русі та заборона руху вантажним автомобілям дає позитивні

Таблиця 1

Рівень шуму в різних точках на вулиці Винниченка міста Луцьк в осінній та зимовий періоди 2023–2024 рр.

№ точки дослідження	Назва точки дослідження	Рівень шуму, дБ	
		Біля дороги восени	Біля дороги взимку
1	Проспект Василя Мойсея, 2а	80,3	84,0
2	Винниченка, 30	75,2	74,8
3	Винниченка, 28	69,8	74,4
4	Винниченка, 51	64,3	70,1
5	Винниченка, 16	51,3	46,7
6	Винниченка, 4	66,2	69,6
7	ЦУМ, зупинка маршрутного транспорту в м. Луцьк	78,9	83,2

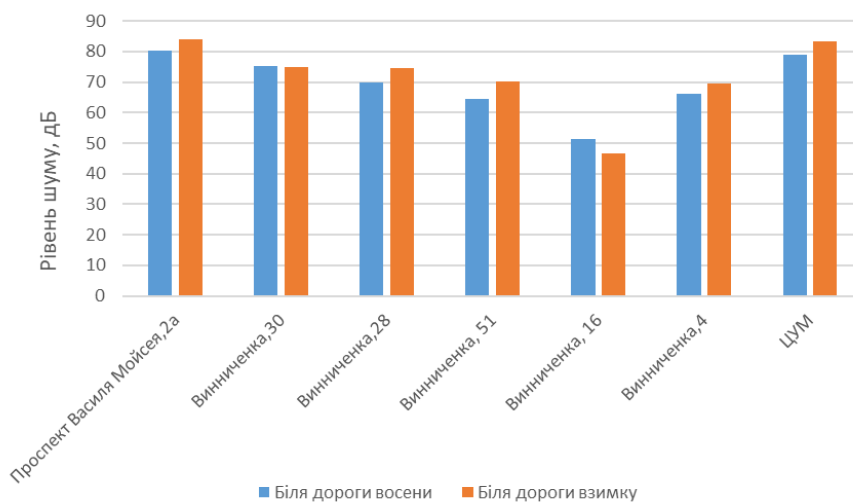


Рис. 3. Порівняльна характеристика рівня шумового навантаження в різних зонах на вулиці Винниченка м. Луцьк

результати. У свою чергу, для стабільного покращення ситуації із зменшенням негативної дії шуму потрібно проводити модернізацію дорожнього покриття. Рекомендується збільшити

кількість зелених насаджень вздовж вулиці Винниченка. Перспективним для подальших досліджень є здійснення моніторингу шумового навантаження на інших вулицях міста Луцьк.

ЛІТЕРАТУРА:

- Бедрій Я. Промислова екологія. Навчальний посібник. Київ : Кондор, 2016. 374 с.
- Дорошко Є. В. Шумове забруднення прилеглих до автомобільної дороги територій та деякі засоби боротьби з ним. *Вісник ХНАДУ*. 2023. Т. 1, № 103. С. 176–182. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.176>
- ДБН В.1.1-31:2013. Захист територій, будинків і споруд від шуму. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3083626778627933844?doc_type=2 (дата звернення: 27.08.2024).
- Гринчишин Н., Шуплат Т., Жоріна О. Шумове забруднення магістральних вулиць центральної частини міста Львова. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2021. № 24. С. 6–11. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20784643.24.2021.01>
- Лавринюк З., Караїм О., Рабан О., Сисоєва Ю. Оцінка шумового забруднення центрального та 33 мікрорайонів міста Луцьк. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. № 3. С. 44–50. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-3-6>
- Іваненко О., Носачова Ю. Техноекологія. Київ : Кондор, 2017. 294 с.
- Про затвердження Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови: Наказ МОЗ України від 22.02.2019. № 463. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0281-19#Text> (дата звернення: 27.08.2024).
- Шум у громадських місцях: що заборонено і яка відповідальність. Всеукраїнське професійне юридичне видання. URL: <https://yur-gazeta.com/golovna/shum-u-gromadskih-miscyah-shcho-zaboroneno-i-yaka-vidpovidalnist.html> (дата звернення: 25.08.2024).

9. Nobile F. Long-term exposure to air pollution and incidence of mental disorders. A large longitudinal cohort study of adults within an urban area. SCISPACE. URL: <https://typeset.io/papers/long-term-exposure-to-air-pollution-and-incidence-of-mental-2bvwm6cs1>

10. Shi J. Contributions of residential traffic noise to depression and mental wellbeing in hong kong: a prospective cohort study. SCISPACE. URL: <https://typeset.io/papers/contributions-of-residential-traffic-noise-to-depression-and-21bdkg95>

11. Tsimpida D., Tsakiridi A. The relationship between noise pollution and depression and implications for healthy ageing: a spatial analysis using routinely collected primary care data. SCISPACE. URL: <https://typeset.io/papers/the-relationship-between-noise-pollution-and-depression-and-2vnttz1ejh>

12. Tung C.T. Interplay of traffic flow, noise, and air pollutants on mental illness in the REVEAL-HBV cohort study. SCISPACE. URL: <https://typeset.io/papers/interplay-of-traffic-flow-noise-and-air-pollutants-on-mental-30khaxewew>

REFERENCES:

1. Bedrii, Y. (2016). *Promyslova ekolohiia: navchal'nyi posibnyk*. [Industrial ecology textbook]. Kyiv. 374 p.[in Ukrainian].

2. Dorozhko, E.V. (2023). Shumove zabrudnennya pryleglykh do avtomobil'noi dorohy terytorii ta deyaki zasoby borot'by z nym. [Noise pollution of the areas adjacent to the road and some means of combating it.] *Visnyk CHNADU*. C. 1. № 103. P. 176–182. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.176>. [in Ukrainian].

3. DBN V.1.1-31:2013 *Zakhyst terytorii, budynkiv i sporud vid shumu*. [Protection of territories, buildings and structures from noise]. Retrieved from https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3083626778627933844?doc_type=2. [in Ukrainian].

4. Hrynychshyn, N., Shuplat, T., & Zhorina, O. (2021). Shumove zabrudnennya magistralnykh vulyts tsentralnoi chastyny mista Lvova [Noise pollution of the main streets of the central part of Lviv. bulletin of lviv state university of life safety]. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiedialnosti*. № 24. P. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.24.2021.01>. [in Ukrainian].

5. Lavrynyuk, Z., Karaim, O., Raban, O., & Sysoieva, Y. (2024). Otsinka shumovoho zabrudnennia tsentralnoho ta 33 mikroraiioniv mista Lutsk [Quantitative Assessment of Noise Pollution in the Central Part and 33 Microdistricts of Lutsk]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*. 3. P. 44–50. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-3-6>.

6. Ivanenko, O., & Nosacheva, Y. (2017). *Tekhnookolohiia*. [Technoecology]. Kyiv : Kondor. 294 p. [in Ukrainian].

7. Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm dopustymykh rivniv shumu v prymishchenniakh zhytlovykh ta hromadskykh budynkiv i na terytorii zhytlovoi zabudovy [On the approval of the State sanitary norms of permissible noise levels in the premises of residential and public buildings and on the territory of residential buildings]: Nakaz MOZ Ukrainy vid 22.02.2019. № 463. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0281-19#Text>. [in Ukrainian].

8. Shum u hromadskykh mistyakh: shcho zaboroneno i yaka vidpovidalnist [Noise in public places: what is prohibited and what is the responsibility]. Retrieved from <https://yur-gazeta.com/golovna/shum-u-gromadskih-miscyah-shcho-zaboroneno-i-yaka-vidpovidalnist.html>. [in Ukrainian].

9. Nobile, F. Long-term exposure to air pollution and incidence of mental disorders. A large longitudinal cohort study of adults within an urban area. SCISPACE. Retrieved from <https://typeset.io/papers/long-term-exposure-to-air-pollution-and-incidence-of-mental-2bvwm6cs1>

10. Shi, J. Contributions of residential traffic noise to depression and mental wellbeing in hong kong: a prospective cohort study. SCISPACE. Retrieved from <https://typeset.io/papers/contributions-of-residential-traffic-noise-to-depression-and-21bdkg95>

11. Tsimpida, D., & Tsakiridi, A. The relationship between noise pollution and depression and implications for healthy ageing: a spatial analysis using routinely collected primary care data. SCISPACE. Retrieved from <https://typeset.io/papers/the-relationship-between-noise-pollution-and-depression-and-2vnttz1ejh>

12. Tung, C.T. Interplay of traffic flow, noise, and air pollutants on mental illness in the REVEAL-HBV cohort study. SCISPACE. Retrieved from <https://typeset.io/papers/interplay-of-traffic-flow-noise-and-air-pollutants-on-mental-30khaxewew>

УДК 574(582+591.5+592/599)

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-11>

Людмила САВЧУК

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

ORCID: 0000-0002-8854-6600

Роман ШУЛИПА

магістр кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Бібліографічний опис статті: Савчук, Л., Шулипа, Р. (2025). Моніторинг загибелі деревостанів у Звіривському лісництві. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 83–87, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-11>

МОНІТОРИНГ ЗАГИБЕЛІ ДЕРЕВОСТАНІВ У ЗВІРІВСЬКОМУ ЛІСНИЦТВІ

Загибель деревостанів – є однією з ключових екологічних проблем Звіривського лісництва, що впливає на стабільність лісових екосистем. Лісові масиви не тільки виконують важливу екологічну функцію, а також є середовищем існування численних видів флори і фауни, які формують унікальну екосистему регіону.

Метою роботи – є дослідження динаміки загибелі деревостанів у Звіривському лісництві за 2019-2021 рр., визначення основних причин даного процесу.

До основних аспектів дослідження загибелі деревостанів у лісництві, належить аналіз масштабів загибелі, оцінка впливу природних та антропогенних факторів, а також визначення ефективних заходів, щодо зменшення втрат лісових масивів. Для цього проводився комплексний аналіз, який включає:

- 1) Визначення площі загибелі, та можливості природного відновлення на поражених територіях.
- 2) Вивчення основних причин загибелі деревостанів, серед яких хвороби, шкідники та антропогенне навантаження, яке спричинило інтенсивніше розповсюдження цих хвороб і шкідників.
- 3) Розробку рекомендацій, щодо зменшення загибелі деревостанів.

Дослідження, були проведені в період з 2020 по 2025 рр. Нами вперше було систематизовано та проаналізовано ключові причини втрати деревостанів. У дослідженні застосовувалися сучасні методи моніторингу лісових масивів. Особливу увагу було приділено визначенню площі загибелі деревостанів та аналізу динаміки цього процесу за 2019–2021 рр.

Результати дослідження свідчать, про поступове збільшення площі загибелі деревостанів у 2019 та 2020 рр. порівняно з 2021 р. Основними причинами втрат – є поширення хвороб, шкідників (комахи). У відповідь на ці виклики у Звіривському лісництві розробляються заходи, щодо зменшення втрат лісових площ, серед яких: вибірково та суцільно-санітарні рубки; біологічні методи захисту деревних порід.

Ключові слова: загибель деревостанів, шкідники, хвороби лісу, санітарні та вибіркові рубки.

Liudmyla SAVCHUK

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

ORCID: 0000-0002-8854-6600

Roman SHULYPA

Master at the Department of Ecology and Protection of Environment, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

To cite this article: Savchuk L., Shulypa R. (2025). Monitorynh zahybeli derevostaniv u Zvirivskomu lisnytstvi [Monitoring of the death of stands in Zviriv forestry]. *Problems of chemistry and sustainable development*, 1, 83–87, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-11>

MONITORING OF STAND MORTALITY IN ZVIRIVSKE FORESTRY

The loss of tree stands is one of the key environmental problems of Zvirivske Forestry, which affects the stability of forest ecosystems. Forests not only fulfill an important ecological function, but also serve as a habitat for numerous species of flora and fauna that form a unique ecosystem of the region.

The purpose of the study is to investigate the dynamics of tree mortality in Zviriv forestry in 2019–2021, to determine the main causes of this process. The main aspects of the study of stand mortality in the forestry include analyzing the scale of mortality, assessing the impact of natural and anthropogenic factors, and identifying effective measures to reduce forest loss. For this purpose, a comprehensive analysis was conducted, which includes:

1) Determination of the area of death and the possibility of natural recovery in the of natural recovery in the affected areas.

2) Study of the main causes of the forests' death, including diseases, pests and anthropogenic pressure that led to the intensive spread of these diseases and pests.

3) Developing recommendations to reduce the loss of stands.

The research was conducted in the period from 2020 to 2025.

For the first time, we systematized and analyzed the key causes of forest loss. The study used modern methods of forest monitoring. Particular attention was paid to determining the area of stand mortality and analyzing the dynamics of this process in 2019–2021.

The results of the study show a gradual increase in the area of stand mortality in 2019 and 2020 compared to 2021. The main causes of losses are the spread of diseases and pests (insects). In response to these challenges, Zvirivske Forestry is developing measures to reduce the loss of forest areas, including selective and clear-cutting felling; biological methods of tree species protection.

Key words: *stand mortality, pests, forest diseases, sanitary and selective felling.*

Актуальність проблеми. Загибель деревостанів у Звіривському лісництві негативно позначається на стійкості лісових екосистем та природному балансі регіону, що також зумовлює деградацію насаджень і зменшення їхньої продуктивності.

На сучасному етапі необхідним, є систематичний моніторинг загибелі деревних порід, оцінка основних ризиків та впровадження ефективних заходів для мінімізації втрат лісового покриття. Використання адаптивних методів управління лісами, в тому числі санітарних рубок, боротьби зі шкідниками, сприяє збереженню екологічного балансу та забезпеченню сталого розвитку лісового господарства.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Екологічні дослідження змін у лісових масивах Волинської області висвітлені у працях (Андрієнко, Прядко, 2006; Мельник, Савчук, 2007). Дослідження впливу шкідників і хвороб на стан лісових масивів та напрямки зменшення загроз біорізноманіття висвітлено у працях (Дудкіна, 2003; Савчук, Шулипа, 2024; Савчук, Шулипа, 2024; Савчук, Шулипа 2024). Однак питання аналізу динаміки загибелі деревостанів у Звіривському лісництві залишається недостатньо вивченим, що зумовлює потребу в моніторингу цієї проблеми.

Метою дослідження, є аналіз масштабів загибелі деревостанів у Звіривському лісництві за 2019-2021 рр., виявлення основних причин

цього явища, розробка рекомендацій, щодо зменшення втрат лісового покриття.

Виклад основного матеріалу дослідження. Протягом останніх років Звіривське лісництво, має численні викликами, пов'язані з необхідністю збереження та захисту лісових масивів. Однією з важливих екологічних проблем, є питання загибелі деревостанів, яке потребувало детального аналізу та впровадження ефективних заходів для зменшення втрат.

Період 2019–2021 рр. виявився нестабільним у динаміці загибелі деревостанів. Якщо у 2020 р. спостерігався пік втрат, в 2021 р. площа загибелі скоротилася. Це свідчить про можливість ефективного управління лісовими екосистемами, за умови впровадження вчасних лісгосподарських заходів. На рис. 1. розглянемо площу загибелі деревостанів у га за 2019 р.

Дана гістограма демонструє, що загальна площа загибелі лісових деревостанів була відносно великою. Основними причинами втрат стали шкідливі комахи, такі як: верхівковий короїд (*Ips acuminatus*) – вражає соснові ліси, спричиняючи масову загибель дерев; шестизубий короїд (*Ips sexdentatus*) – атакує ослаблені соснові насадження, викликаючи їх всихання; непарний шовкопряд (*Lymantria dispar*) – об'їдає листя дуба звичайного (*Quercus robur*), граба звичайного (*Carpinus betulus*), що робить їх вразливими до хвороб; короїд-типограф (*Ips typographus*) – найнебезпечніший

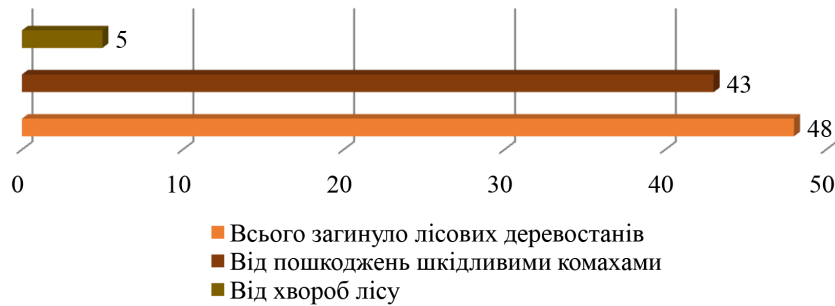


Рис. 1. Площа загибелі лісових деревостанів у (га) за 2019 р.

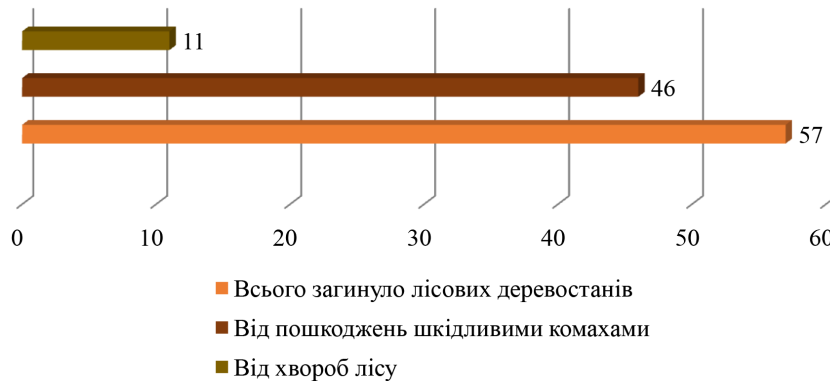


Рис. 2. Площа загибелі лісових деревостанів у (га) за 2020 р.

шкідник ялини європейської (*Picea abies*). Уражені дерева змінюють забарвлення хвої на червоно-буре – швидко гинуть; шовкопряд-монашка (*Lymantria monacha*) – живиться хвоєю сосни звичайної (*Pinus sylvestris*) та *P. abies*. Масове поширення спричиняє загибель деревних порід; сосновий пільщик (*Diprion pini*) – живиться *P. sylvestris*, при масовому розмноженні викликає загибель деревостанів; вусач ялиновий галійський (*Monochamus galloprovincialis*) – личинки живляться деревиною, що спричиняє руйнування та передчасну загибель дерев; жук-лускун (*Agriotes spp.*) – личинки пошкоджують коріння молодих дерев, що спричиняє їх загибель.

А також загибелі сприяли й хвороби, такі як: опеньок осінній (*Armillaria mellea*), що паразитує на коренях дерев, викликаючи їх всихання.

Зважаючи на рівень загибелі дерев у 2019 р., також були помітні перші ознаки погіршення стану насаджень, що зумовило необхідність активного моніторингу та впровадження відповідних заходів. Детальний аналіз пошкоджених ділянок показав, що найбільші втрати спостерігалися у соснових лісах, особливо на піщаних ґрунтах, які є менш стійкими до кліматичних коливань. Також варто зазначити, що загибель

молодих насаджень теж спостерігалась, що свідчить про необхідність додаткових заходів, щодо захисту молодих деревостанів.

На рис. 2, подано площу загибелі деревостанів за 2020р.

Гістограма відображає, значне збільшення площ загибелі деревостанів порівняно з 2019 р.

Основні причини цього процесу пов'язані з: посиленням кліматичних змін, що спричинили тривалі посухи в літній період; масовим розповсюдженням шкідників, що призвело до значного пошкодження соснових насаджень; грибковими захворюваннями, які активно розвивалися на ослаблених деревах.

У відповідь на ці виклики в лісництві були запроваджені заходи з вибіркової та суцільно-санітарної рубки, спрямовані на видалення уражених дерев та запобігання подальшому поширенню шкідників. Також важливо зазначити, що окрім природних чинників, певну роль у загибелі деревостанів відіграли людські фактори, надмірне рекреаційне навантаження та забруднення ґрунтів. Ці аспекти потребують ретельного моніторингу та впровадження додаткових заходів для зменшення негативного впливу на лісові екосистеми.

На рис. 3, розглянемо площу загибелі деревостанів за 2021р.



Рис. 3. Площа загибелі лісових деревостанів у (га) за 2021 р.

Дана гістограма, чітко демонструє зниження загибелі лісових деревостанів. Основними чинниками, що спричинили таке зниження, стали: покращення лісогосподарських заходів; зменшення впливу шкідників і хвороб; зниження антропогенного впливу.

Дані заходи з охорони та збереження лісових екосистем, є ефективними та дають позитивні результати. Зниження загибелі деревостанів вказує на покращення екологічної ситуації, стабілізацію лісових екосистем та зростання їх стійкості до природних і антропогенних загроз. Це важливий показник сталого розвитку лісового господарства та відповідного ставлення до природних ресурсів.

Порівняння даних за три роки показує стійку тенденцію до збільшення площ загибелі деревостанів з 2019–2020 рр., але 2021 р. були прийняті відповідні заходи, що дали свій позитивний результат.

Висновки і перспективи подальших досліджень. На основі проведеного дослідження, можна зробити висновок, що Звірівське лісництво демонструє ефективний підхід

до зменшення загибелі деревостанів, застосовуючи комплексні природоохоронні та лісогосподарські заходи. Вчасне виявлення проблемних ділянок, впровадження санітарних рубок, моніторинг лісових масивів і боротьба з шкідниками сприяють підтримці стабільності екосистеми. Однак, для досягнення довгострокової стійкості необхідне подальше вдосконалення заходів, серед яких ключовими є:

1) Розширення системи моніторингу стану лісових екосистем, що дозволить вчасно виявляти проблемні ділянки та запобігати масовому поширенню хвороб і шкідників.

2) Покращення заходів боротьби зі шкідниками, які сприяють збереженню деревостанів.

3) Підвищення ефективності санітарних рубок для видалення пошкоджених і заражених дерев, що запобігатиме поширенню захворювань.

Перспективними напрямками подальших досліджень, є розробка природоохоронних програм управління лісовими екосистемами та застосування новітніх технологій у системі лісовідновлення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Андрієнко Т.Л., Прядко О.І. Раритетні компоненти флори судинних рослин Українського Полісся. Фіторізноманіття Українського Полісся та його охорона / за ред. Т.Л. Андрієнко. Київ : Фітосоціологічний центр, 2006. С. 89–122.
2. Дудкін О.В. Оцінка і напрями зменшення загроз біорізноманіття України. К. : Хімджест, 2003. 255 с.
3. Мельник В.І., Савчук Л.А. Береза низька (*Betula humilis* Schrank) в Україні. Луцьк : Вежа, 2007. 136 с.
4. Савчук Л.А., Шулипа Р.І. «Відтворення лісів у Звірівському лісництві – шлях до збереження біорізноманіття та сталого розвитку». *Матеріали XVIII Міжнародної наук – прак. конф. (14 листопада 2024 р.)*. Луцьк, 2024. С. 195–198.
5. Савчук Л.А., Шулипа Р.І. Екологічна характеристика біорізноманіття філії «Ківерцівське лісове господарство» ДП «Ліси України» (Звірівське лісництво). *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. № 2. С. 48–54.
6. Савчук Л.А., Шулипа Р.І. Штучне та природне лісовідновлення у Звірівському лісництві. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. № 4. С. 93–98.

REFERENCES:

1. Andriienko, T.L., & Priadko, O.I. (2006). Rarytetni komponenty flory sudynnykh roslyn Ukrainckoho Polissia [Rare components of the vascular plant flora of Ukrainian Polissya]. *Fitoriznomanittia Ukrainckoho Polissia ta yoho ohorona – Phytodiversity of Ukrainian Polissya and its protection*. T.L.Andrienko (Ed.). Kyiv : “Fitosociolohichniy tsentr” [in Ukrainian].
2. Dudkin, O.V. (2003). *Otsinka i napriamy zmenshennia zahroz bioriznomanittia Ukrainy [Assessment and ways to reduce threats to biodiversity in Ukraine]*. Kyiv : Khimdzhest [in Ukrainian].
3. Melnyk, V.I., & Savchuk, L.A. (2007). *Bereza nyzka (Betula humilis Schrank) v Ukraini [Low birch (Betula humilis Schrank) in Ukraine]*. Lutsk: “Vezha” [in Ukrainian].
4. Savchuk, L.A., & Shulypa, R.I. (2024). Vidtvorennia lisiv u Zvirivskomu lisnytstvi – shliakh do zberezhenntia bioriznomanittia ta stalogo rozvytku [Restoration of forests in Zviriv forestry is a way to preserve biodiversity and sustainable development]. Proceedings from MIIM `24: *VIII Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia “Aktualni problem rozvytku pryrodnychych ta humanitarnuch nauk” The Eighth International Scientific and Practical Conference “Current issues in the development of natural sciences and humanities”*. (pp. 195 -198). Lutsk : VNU imeni Lesi Ukrainky [in Ukrainian].
5. Savchuk, L.A., & Shulypa, R.I. (2024). Ekologichna charakterystyka bioriznomanittia philia “Kivertsivske lisove hospodarstvo” DP “Lisy Ukrainy” (Zvirivske lisnytstvo) [Ecological characterization of biodiversity of the branch “Kivertsivske forestry” of the State Enterprise “Forests of Ukraine” (Zvirivske forestry)]. *Problemy khimii ta stalogo rozvytku – Problems of chemistry and sustainable development*, 2, 48–54 [in Ukrainian].
6. Savchuk, L.A., & Shulypa, R.I. (2024). Shtuchne ta pryrodne lisovidnovlennia u Zvirivskomu lisnytstvi [Artificial and natural reforestation in Zvirivske forestry]. *Problemy khimii ta stalogo rozvytku – Problems of chemistry and sustainable development*, 4, 93–98 [in Ukrainian].

ОСВІТНІ, ПЕДАГОГІЧНІ НАУКИ. ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА

УДК 378.147:004.9

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-12>

Василь БАРЛАДИН

аспірант кафедри машинознавства і транспорту, Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, вул. Максима Кривоноса, 2, м. Тернопіль, Україна, 46000

ORCID: 0009-0008-7157-6660

Бібліографічний опис статті: Барладин, В. (2025). До проблеми виокремлення педагогічних умов підготовки майбутніх педагогів професійного навчання у закладах вищої освіти в умовах цифровізації. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 88–93, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-12>

ДО ПРОБЛЕМИ ВИОКРЕМЛЕННЯ ПЕДАГОГІЧНИХ УМОВ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ ПЕДАГОГІВ ПРОФЕСІЙНОГО НАВЧАННЯ У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ

Мета роботи. Стійка тенденція апгрейду підходів у сфері освітнього менеджменту на сьогодні трансформується в концепцію оптимізації якості освіти. Особливої ваги зазначена тенденція набуває на тлі глобальної цифровізації освітнього середовища, необхідності забезпечення належного рівня конкурентоспроможності навчальних закладів та удосконалення процесу підготовки майбутніх педагогів професійного навчання. Нові умови диктують необхідність належного забезпечення педагогічних умов підготовки майбутніх фахівців. Метою статті є аналіз аспектів виокремлення педагогічних умов підготовки майбутніх педагогів професійного навчання у закладах вищої освіти.

Методологія. У процесі роботи над статтею застосовано низку загальнонаукових методів дослідження, у тому числі, аналіз літературних джерел, порівняння, систематизацію та узагальнення. Дослідження відносяться до категорії описових і включає тематичні дослідження та аналіз вторинних даних.

Наукова новизна. У дослідженні встановлено, що для ефективного моделювання навчального процесу потрібно передбачати етап детального планування процесу інтеграції цифрових рішень та забезпечення відповідних педагогічних умов. Уточнено сучасне бачення дефініції «педагогічні умови». Проаналізовано концепції співпраці, адаптивності та персоналізації в освітній сфері на тлі інтенсивної інтеграції цифрових технологій, що характерні для європейського досвіду. Обґрунтовано необхідність персоналізації навчального процесу та забезпечення створення та розвитку індивідуального освітнього середовища.

Висновки. Результати дослідження проблеми виокремлення педагогічних умов підготовки майбутніх педагогів демонструють, що належний розвиток методично-педагогічних процесів в освітній сфері гарантує якість набутих умінь та навичок учасників навчального процесу. Доведено, що ефективне застосування потенціалу інноваційного цифрового інструментарію в межах сучасних стратегій навчання сприяє оптимізації пізнавальної діяльності, поступу критичного мислення та формуванню стійких професійних компетенцій, що в синергії забезпечує успішне становлення педагогів професійного навчання в процесі здобуття вищої освіти.

Ключові слова: виокремлення педагогічних умов, педагоги професійного навчання, цифрова компетентність, інноваційні методи, заклади вищої освіти, інтеграція.

Vasily BARLADIN

PhD Student at the Department of Mechanical Engineering and Transport, Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, 2 Maksyma Kryvonosa str., Ternopil, Ukraine, 46027

ORCID: 0009-0008-7157-6660

To cite this article: Barladyn, V. (2025). Do problemy vyokremlennia pedahohichnykh umov pidhotovky maibutnikh pedahohiv profesiinoho navchannia u zakladakh vyshchoi osvity v umovakh tsyfrovizatsii [On the problem of identifying pedagogical conditions for training future teachers of vocational education in higher education institutions in the context of digitalization]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 88–93, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-12>

ON THE PROBLEM OF IDENTIFYING THE PEDAGOGICAL CONDITIONS FOR TRAINING FUTURE VOCATIONAL TEACHERS IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS IN THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION

Purpose of the work. The steady trend of upgrading approaches in the field of educational management is currently being transformed into the concept of optimizing the quality of education. This trend is gaining particular importance against the background of the global digitalization of the educational environment, the need to ensure the proper level of competitiveness of educational institutions and improve the process of training future teachers of vocational education. New conditions dictate the need to properly ensure pedagogical conditions for the training of future specialists. The purpose of the article is to analyze the aspects of identifying pedagogical conditions for the training of future teachers of vocational education in higher education institutions.

Methodology. In the process of working on the article, a number of general scientific research methods were applied, including analysis of literary sources, comparison, systematization and generalization. The study belongs to the category of descriptive and includes case studies and analysis of secondary data.

Scientific novelty. The study found that for effective modeling of the educational process, it is necessary to provide for a stage of detailed planning of the process of integrating digital solutions and ensuring appropriate pedagogical conditions. The modern vision of the definition of «pedagogical conditions» is clarified. The concepts of cooperation, adaptability and personalization in the educational sphere are analyzed against the background of the intensive integration of digital technologies, which are characteristic of the European experience. The need for personalization of the educational process and ensuring the creation and development of an individual educational environment is substantiated.

Conclusions. The results of the study of the problem of identifying pedagogical conditions for the training of future teachers demonstrate that the proper development of management processes in the educational sphere guarantees the quality of the acquired skills and abilities of participants in the educational process. It is proven that the effective use of the potential of innovative digital tools within modern learning strategies contributes to the optimization of cognitive activity, the advancement of critical thinking and the formation of sustainable professional competencies, which in synergy ensures the successful formation of teachers of vocational training in the process of obtaining higher education.

Key words: separation of pedagogical conditions, vocational education teachers, digital competence, innovative methods, higher education institutions, integration.

Актуальність проблеми. Трансформація сучасної освітньої сфери в контексті цифрового апгрейду основних процесів вимагає динаміки методико-педагогічних підходів у галузі. Наростаючий вплив інформаційного навантаження та інновацій комунікаційної сфери вимагають розширення меж процесу інтеграції систем онлайн-освіти та використання принципово нових підходів до моделювання освітнього процесу, що позначається на педагогічних умовах освітнього процесу.

Цифровий інструментарій у форматі Zoom, Moodle, Google Classroom, Word Pad, Google Meet, MathCAD тощо дозволяє суттєво підвищити результативність навчання. Водночас, актуалізація онлайн-концепцій освітнього забезпечення різних рівнів супроводжується низкою супутніх викликів. Серед них – забезпечення цифрової грамотності учасників освітнього процесу, необхідність використання онлайн-ресурсів для високого рівня інтерактивності навчального процесу, присутність навичок спільної діяльності та критичного мислення (Хриков, 2022). Моделювання освітнього процесу повинно відбуватись на основі принципу забезпечення якості набутих

знань, адаптивності освіти та ефективності навчального контенту, що є основними постулатами сталого розвитку освітньої галузі.

У даному контексті особливої значущості набуває проблема виокремлення педагогічних умов підготовки майбутніх педагогів професійного навчання у закладах вищої освіти, адже саме зазначені фахівці виступають в ролі детермінанти якості професійної освіти, а їх компетенції мають відповідати сучасним вимогам цифровізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективне планування освітнього процесу в напрямку цифрової компетентності, на переконання дослідників Яремчук та Назар (2021), вимагає належної якості освітнього контенту та інтеграції інноваційних підходів до адміністрування. У працях Литвин (2022) досліджено варіативність практичного інструментарію виокремлення педагогічних умов та міжпредметної взаємодії в контексті індивідуалізації навчання в аспектах формування низки компетенцій, що актуально в контексті підготовки майбутніх педагогів професійного навчання.

Як стверджується в публікаціях Zhao et al. (2021), трансформація освітніх підходів

передбачає інтенсивний професійний розвиток педагогів, опанування ними цифрових компетенцій та навичок інноваційного навчання. Навчальні програми та проекти повинні бути актуальними, практичними та цікавими для студентів (Voichenko, 2023). Sinyueva et al. (2023) у даному контексті пропагують проєктне навчання для розвитку соціальних комунікацій – роботи в команді, лідерства, критичного мислення. Castro-Alonso та ін. (2021), водночас, акцентують на необхідності відповідного прогностичного моделювання освітнього процесу для забезпечення належних педагогічних умов.

Як свідчить європейський досвід, цифрові технології є каталізатором трансформації освітнього процесу (Gallagher & Savage, 2023). Очевидно, що такі заходи вимагають ретельного аналізу технічної та інформаційної інфраструктури навчальних закладів для розроблення нових підходів щодо методологічного забезпечення навчального процесу. Належна увага до освітнього менеджменту, в даному контексті, дозволить забезпечити безперервний характер розвитку та ефективну індивідуалізацію сучасної освіти на різних рівнях. На сьогодні зазначені питання залишаються малодослідженими, що актуалізує тематику даної статті.

Мета дослідження. Метою статті є аналіз аспектів виокремлення педагогічних умов підготовки майбутніх педагогів професійного навчання у закладах вищої освіти.

Виклад основного матеріалу дослідження. Технології цифровізації, попри дотичні виклики, формують низку ефективних інструментів практико-орієнтованого навчання, які дозволяють оптимізувати процеси вивчення та узагальнення, просторового усвідомлення та візуалізованого сприйняття складних дефініцій та понять. Також, вони сприяють формуванню специфічних професійних навичок, створює уявні простори для невирішених завдань, розвиває креативність, когнітивну сферу, відтворюючи реальні практичні ситуації (Falcione та ін., 2019).

Як переконливо засвідчує успішна європейська практика, розуміння значущості цифрової компетентності сприяє ефективній адаптації педагогічних підходів до вимог поточної освітньої моделі та суспільства, що, в кінцевому вигляді, чинить суттєвий вплив на рівень навчальних досягнень у цифровому

інноваційному навчанні. У більшості європейських університетів пропонуються освітні програми не професійного, а академічного рівня, зосереджені на практичному впровадженні теоретичних знань та умінь в широких соціальних, політичних та економічних сферах (Eker & Eker, 2023).

Разом із тим, завдяки мобільним технологіям та масштабній цифровізації суспільства освіта перетворюється з концепту «лекції» в концепт «діалогу» між здобувачем освіти та викладачем, а сам освітній процес трансформується від засвоєння знань до їх продукування (Canaran & Mirici, 2019). Дозволяючи проектувати та моделювати необмежені освітні середовища та сценарії взаємодії, моделювання освітнього середовища на основі інновацій володіє ознаками прогностичного успіху (Adiyono та ін., 2024).

Загальна методологія формування професійної компетентності майбутніх педагогів професійного навчання у закладах вищої освіти включає наступні етапи:

- 1) попередня ідентифікація основних проблем та викликів в досліджуваній сфері;
- 2) формування методологічних та теоретичних принципів;
- 3) ідентифікація основних завдань та загальної мети процесу;
- 4) формування педагогічної моделі міждисциплінарної інтеграції, з виокремленням системних взаємозалежностей, виділенням основних параметрів та відповідних критеріїв їх оцінки;
- 5) інтеграція моделі до освітнього процесу на основі принципів послідовності та системності;
- 6) інтерпретація результатів застосування моделі, визначення вузьких місць та шляхів вдосконалення концепції

Зважаючи на вище зазначене, постає виразна проблема виокремлення педагогічних умов підготовки майбутніх педагогів професійного навчання у закладах вищої освіти. Дефініція «*педагогічні умови*», традиційно, розглядається як певна обставина чи обстановка, яка спроможна позитивно чи негативно впливати на процеси формування та подальшого розвитку педагогічних якостей, процесів та систем (Вдовичин, 2013).

Дослідник Литвин (2022) під дефініцією педагогічних умов пропонує розуміти систему

об'єктивних потенцій змісту методів навчання, матеріальних можливостей та організаційних форм їх реалізації, що в сукупності спроможні забезпечити успішну реалізацію поставлених цілей. Разом із тим, Хриков (2022) детермінує поняття педагогічних умов як взаємопов'язану множину зовнішніх особливостей та внутрішніх параметрів функціонування, яка гарантує високий рівень результативності навчального процесу.

Загалом, педагогічні умови доцільно розглядати як обставини, за яких компоненти навчального процесу репрезентовані в оптимальному форматі взаємозв'язку, що дозволяє забезпечити атмосферу плідної взаємодії між учасниками освітнього процесу та сприяє ефективності викладання та методології навчального процесу, а також результативності освітньої стратегії (Вдовичин, 2013).

В умовах активної цифровізації навчальний процес потребує організаційно-діяльнісного підходу до визначення і реалізації спеціальних педагогічних умов. Зазначені умови повинні відповідати поставленим цілям підготовки майбутніх педагогів професійного навчання. Процес виокремлення педагогічних умов має охоплювати усі сфери взаємодії між викладачами, студентами та іншими суб'єктами освітнього процесу.

Ефективна ідентифікація педагогічних умов навчального процесу є основою апгрейду навчального процесу, підняття його на новий рівень, що забезпечить наступність та послідовність засвоєння професійних знань, умінь та навичок у процесі навчання. Також, коректно виявлені та реалізовані педагогічні умови сприятимуть всебічному розвитку особистості студента, розкриватимуть його здібності та таланти, підвищуватимуть вмотивованість та професійну спрямованість.

Стратегія співпраці в навчанні вимагає для свого розвитку належної мотивації та ефективного контролю. Водночас, успіх методологічної стратегії індивідуалізації навчання визначається рівнем організації доступу до ресурсів і належного планування. Окрім того, адаптація до онлайн-навчання вимагає оптимізації концепції стратегічного планування та організації, адже існуючі підходи менеджменту позиціонуються як малоефективні. Важливою, при цьому, є трансформація позиції педагога до самого

себе як єдиного вірного джерела інформації. Згідно з вимогами сучасної освітньої концепції, педагог повинен займати позицію, за якої стимулює продукування здобувачами освіти думок, відмінних від власних. Мета педагогічної діяльності, при цьому, вбачається у опануванні студентами умінь ефективного опрацювання інформації, позиціонуючи дефініцію критичного типу мислення як самостійне, індивідуальне утворення.

Можна стверджувати, що залучення когнітивності в процесі використання цифрових технологій в освіті дозволяє успішно розвивати практико-орієнтовані освітні програми. У цілому, акцент в системі сучасного освітнього менеджменту має здійснюватися в напрямку стратегічного планування та мотивації. Водночас, моніторинг та контроль результативності є визначальними для успішного моделювання освітнього процесу. Також, особливу увагу необхідно приділяти взаємозв'язку між науковою мотивацією, інноваційними технологіями та академічними досягненнями здобувачів освіти. Усе це має знаходити належне віддзеркалення у процесі виокремлення педагогічних умов підготовки майбутніх педагогів у закладах вищої освіти.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Як свідчить аналіз ефективності сучасних педагогічних завдань з використанням інноваційних підходів до моделювання освітнього процесу, успішність інтеграції цифрових технологій в навчальний процес залежить від ретельного планування. При цьому, етапи організації та контролю володіють детермінуючим функціоналом.

На етапі організації навчального процесу значна роль відводиться проблемі виокремлення педагогічних умов. У контексті підготовки майбутніх педагогів професійного навчання у закладах вищої освіти педагогічні умови розуміються як обставини, при яких компоненти навчального процесу перебувають в максимально ефективному взаємозв'язку та створюють атмосферу плідної співпраці.

Належний розвиток методологічно-педагогічного забезпечення у освітній сфері гарантує якість набутих умінь та навичок учасників навчального процесу. При цьому, ефективно застосування потенціалу інноваційного цифрового інструментарію в межах сучасних стратегій навчання сприяє оптимізації пізнавальної

діяльності, поступу критичного мислення та формуванню стійких професійних компетенцій, що в синергії забезпечує успішне становлення педагогів професійного навчання в процесі здобуття вищої освіти.

Тому, в сучасних умовах заклади вищої освіти повинні відповідально підходити до

проблеми виокремлення пріоритетних педагогічних умов для підготовки майбутніх фахівців, слідкувати за інноваціями у відповідній галузі. Це дозволить орієнтуватися на співробітництво між суб'єктами освітнього процесу, активну позицію особистості до навчання, розвиток особистісного потенціалу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Хриков Є. Педагогічні умови в структурі наукового знання. *Вісник Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького. Серія: «Педагогічні науки»*. 2022. № 4. С. 5–10.
2. Яремчук Н., Назар С. Педагогічні умови формування віртуального освітнього простору закладу вищої освіти. *Молодь і ринок*. 2021. № 7/193.
3. Литвин А.В. Методологічні засади поняття «педагогічні умови»: практ. посібник. 3-е вид., доп. Львів : ЛДУБЖД, 2022. 90 с.
4. Zhao Y., Llorente A. M. P., Gómez M. C. S. Digital competence in higher education research: A systematic literature review. *Computers & Education*, 2021. № 168. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104212>
5. Voichenko D. V. Innovations in education management: transformation of the modern system. In *Innovations and scientific potential of the world: materials of the III International Scientific Conference. International Center for Scientific Research*. 2023. Pp. 211–213. UKRLOGOS Group LLC. <http://surl.li/urfqh>
6. Sinyaeva, O., Krekot M., Zavorodniy O., Sychova T., Sychov A. Features of the use of information technologies in education. *Education. Innovation. Practice*. 2023. № 11(7). Pp. 98–104. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol11i7-013>
7. Castro-Alonso J. C., de Koning B. B., Fiorella L., Paas F. Five strategies for optimizing instructional materials: Instructor-and learner-managed cognitive load. *Educational Psychology Review*. 2021. № 33(4). Pp. 1379–1407. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09606-9>
8. Gallagher S. E., Savage T. Challenge-based learning in higher education: an exploratory literature review. *Teaching in Higher Education*. 2023. № 28(6). Pp. 1135–1157. <https://doi.org/10.1080/13562517.2020.1863354>
9. Falcione S., Campbell E., McCollum B., Chamberlain J., Macias M., Morsch L., Pinder C. Emergence of Different Perspectives of Success in Collaborative Learning. *The Canadian Journal for the Scholarship of Teaching and Learning*. 2019. № 10(2). Pp. 1–23. <https://doi.org/10.5206/cjsotl-rcacea.2019.2.8227>
10. Eker B., Eker A. A. Quality criteria in universities. *Journal of Innovations in Business and Industry*. 2023. № 1(02). Pp. 65–70. <https://doi.org/10.61552/JIBI.2023.02.002>
11. Canaran Ö., Mirici İ. H. An Overview of the Recent Views and Practices in Teacher Professional Development. *Eğitimde Kuram ve Uygulama*. 2019. № 15(4). Pp. 350–362. <https://doi.org/10.17244/eku.559281>
12. Adiyono A., Hayat E. W., Oktavia E. D., Prasetyo N. T. Learning interaction in the digital era: Technological innovations and education management strategies to enhance student engagement. *Journal of Research in Instructional*. 2023. № 4(1). Pp. 205–221. <https://doi.org/10.30862/jri.v4i1.333>
13. Вдовичин Т. Я. Обґрунтування організаційно-педагогічних умов для забезпечення навчального процесу майбутніх бакалаврів інформатики. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми*. 2013. № 34. С. 225–230.

REFERENCES:

1. Khrykov, Ye. (2022). Pedahohichni umovy v strukturi naukovooho znannia [Pedagogical conditions in the structure of scientific knowledge]. *Visnyk Cherkaskoho natsionalnoho universytetu imeni Bohdana Khmelnytskoho. Seriya: "Pedahohichni nauky"*, 4, 5–10. [in Ukrainian]
2. Iaremchuk, N., & Nazar, S. (2021). Pedahohichni umovy formuvannia virtualnoho osvitnoho prostoru zakladu vyshchoi osvity [Pedagogical conditions for the formation of the virtual educational space of a higher education institution]. *Molod i rynek*, 7/193. [in Ukrainian]
3. Lytvyn, A. V. (2022). Metodolohichni zasady poniattia «pedahohichni umovy»: prakt. Posibnyk [Methodological principles of the concept of “pedagogical conditions”: a practical guide], 3-e vyd., dop. Lviv : LDUBZhD. [in Ukrainian]
4. Zhao, Y., Llorente, A. M. P., & Gómez, M. C. S. (2021). Digital competence in higher education research: A systematic literature review. *Computers & Education*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104212>
5. Voichenko, D. V. (2023). Innovations in education management: transformation of the modern system. In *Innovations and scientific potential of the world: materials of the III International Scientific Conference. International Center for Scientific Research*, pp. 211–213. UKRLOGOS Group LLC. <http://surl.li/urfqh>

6. Sinyaeva, O., Krekot, M., Zavorodniy, O., Sychova, T., & Sychoy, A. (2023). Features of the use of information technologies in education. *Education. Innovation. Practice*, 11(7), 98-104. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol11i7-013>
7. Castro-Alonso, J. C., de Koning, B. B., Fiorella, L., & Paas, F. (2021). Five strategies for optimizing instructional materials: Instructor-and learner-managed cognitive load. *Educational Psychology Review*, 33(4), 1379–1407. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09606-9>
8. Gallagher, S. E., & Savage, T. (2023). Challenge-based learning in higher education: an exploratory literature review. *Teaching in Higher Education*, 28(6), 1135–1157. <https://doi.org/10.1080/13562517.2020.1863354>
9. Falcione, S., Campbell, E., McCollum, B., Chamberlain, J., Macias, M., Morsch, L., & Pinder, C. (2019). Emergence of Different Perspectives of Success in Collaborative Learning. *The Canadian Journal for the Scholarship of Teaching and Learning*, 10(2), 1–23. <https://doi.org/10.5206/cjsotl-rcacea.2019.2.8227>
10. Eker, B., & Eker, A. A. (2023). Quality criteria in universities. *Journal of Innovations in Business and Industry*, 1(02), 65–70. <https://doi.org/10.61552/JIBI.2023.02.002>
11. Canaran, Ö., & Mirici, İ. H. (2019). An Overview of the Recent Views and Practices in Teacher Professional Development. *Eğitimde Kuram ve Uygulama*, 15(4), 350–362. <https://doi.org/10.17244/eku.559281>
12. Adiyono, A., Hayat, E. W., Oktavia, E. D., & Prasetyo, N. T. (2024). Learning interaction in the digital era: Technological innovations and education management strategies to enhance student engagement. *Journal of Research in Instructional*, 4(1), 205–221. <https://doi.org/10.30862/jri.v4i1.333>
13. Vdovychyn, T. Ya. (2013). Obhruntuvannia orhanizatsiino-pedahohichnykh umov dlia zabezpechennia navchalnoho protsesu maibutnikh bakalavriv informatyky [Substantiation of organizational and pedagogical conditions for ensuring the educational process of future bachelors of computer science]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii ta innovatsiini metodyky navchannia v pidhotovtsi fakhivtsiv: metodolohiia, teoriia, dosvid, problem*, 34, 225–230. [in Ukrainian]

УДК 378.147:004

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-13>

Ольга ГУЛАЙ

доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри цифрових освітніх технологій, Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43018

ORCID: 0000-0002-1120-6165

Олександр СУШИК

кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри цифрових освітніх технологій, Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43018

ORCID: 0000-0003-2223-4070

Ольга РЕДЬКО

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цифрових освітніх технологій, Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43018

ORCID: 0000-0002-3305-6022

Бібліографічний опис статті: Гулай, О. Сушик, О., Редько, О. (2025). Функції інформаційно-консультативного середовища закладу професійної освіти. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 94–101, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-13>

ФУНКЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-КОНСУЛЬТАТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА ЗАКЛАДУ ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ

У статті проаналізовано тенденції професійної (професійно-технічної) освіти України останнього десятиліття. З метою адаптації закладу професійної освіти до сучасних викликів ринку праці, підвищення якості підготовки кадрів розглянуто можливість створення в закладі освіти цифрового інформаційно-консультативного середовища. Проаналізовано концепції інформаційно-консультативного середовища навчального закладу, принципи та методологічні підходи, інструментарій педагогічного консультування за допомогою інформаційно-комунікативних технологій. Конкретизовано основні функції інформаційно-консультативного середовища. Інформаційна функція полягає у забезпеченні доступу до актуальної та структурованої інформації про навчальні програми, кваліфікаційні стандарти, ринок праці та інші важливі аспекти освіти. Консультаційна функція забезпечує учням і викладачам кваліфіковані консультації щодо навчання, вибору професії та кар'єрного розвитку. Діагностична функція включає моніторинг успішності, визначення рівня підготовки та освітніх потреб. Інтерактивна функція сприяє гнучкому навчальному процесу та дистанційному навчанню через сучасні ІКТ. Координувальна функція передбачає узгодження роботи викладачів, учнів, адміністрації та роботодавців. Професійно-розвивальна функція забезпечує підвищення кваліфікації через тренінги, курси (EdEra, Prometheus), стажування. Методична функція включає розробку та поширення навчальних матеріалів відповідно до освітніх стандартів.

Проведено SWOT-аналіз функціонування інформаційно-консультативного середовища державного професійно-технічного навчального закладу «Луцьке вище професійне училище». Виокремлено основні сильні і слабкі сторони, окреслено можливості та загрози. Цифрове середовище закладу професійної освіти забезпечує обмін інформацією та консультативну підтримку суб'єктів освітнього процесу та є важливою складовою інформаційного суспільства.

Ключові слова: професійна (професійно-технічна) освіта, інформаційно-консультативне середовище, заклад освіти, цифрові засоби, консультативні функції.

Olha HULAI

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor at the Department of Digital Educational Technologies, Lutsk National Technical University, 75 Lvivska str., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43018

ORCID: 0000-0002-1120-6165

Oleksandr SUSHYK

PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Digital Educational Technologies, Lutsk National Technical University, 75 Lvivska str., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43018
ORCID: 0000-0003-2223-4070

Olha REDKO

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Digital Educational Technologies, Lutsk National Technical University, 75 Lvivska str., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43018
ORCID: 0000-0002-3305-6022

To cite this article: Hulai, O., Sushyk, O., Redko, O. (2025). Funktsii informatsiino-konsultatyvnoho seredovyshcha zakladu profesiinoi osvity [Functions of the information and advisory environment of a vocational education institution]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 94–101, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-13>

FUNCTIONS OF THE INFORMATION AND ADVISORY ENVIRONMENT OF A VOCATIONAL EDUCATION INSTITUTION

The article analyses the trends in vocational education in Ukraine over the past decade. With a view to adapting a vocational education institution to the modern challenges of the labour market and improving the quality of training, the possibility of creating a digital information and consulting environment in an educational institution is considered. The concept of the information and consulting environment of an educational institution, principles and methodological approaches, tools for pedagogical consulting using information and communication technologies are analysed. The main functions of the information and consulting environment are specified. The information function is to provide access to up-to-date and structured information about curricula, qualification standards, the labour market and other important aspects of education. The counselling function provides students and teachers with expert advice on education, career choice and career development. The diagnostic function includes monitoring of academic performance, determining the level of training and educational needs. The interactive function promotes flexible learning and distance learning through modern ICT. The coordination function involves coordinating the work of teachers, students, administration and employers. The professional development function provides professional development through trainings, courses (EdEra, Prometheus), and internships. The methodological function includes the development and dissemination of teaching materials in accordance with educational standards.

A SWOT-analysis of the functioning of the information and advisory environment of the State vocational educational institution «Lutsk Higher Vocational School» is carried out. The main strengths and weaknesses are highlighted, opportunities and threats are outlined. The digital environment of a vocational education institution provides information exchange and advisory support for the subjects of the educational process and is an important component of the information society.

Key words: vocational education, information and advisory environment, educational institution, digital means, advisory functions.

Актуальність проблеми. Професійна (професійно-технічна) освіта в Україні довгий час залишалася недооціненою, поступаючи у престижності вищій освіті. Проте останніми роками ситуація змінюється, адже ринок праці дедалі більше потребує кваліфікованих робітників. Однак, згідно з офіційним веб-сайтом Державної служби статистики України (https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2022/osv/osv_rik/arch_pto_u.htm), в Україні спостерігається чітка тенденція зменшення кількості закладів професійної (професійно-технічної) освіти. У 2023 р. нараховувалося 663 освітні заклади цього рівня, що порівняно з 1990 роком менше на 44,3 %; з 2000 роком – на 28,45 %; з 2010 роком – на

28,89 %. Скорочення кількості закладів та учнів у системі професійно-технічної освіти України пов'язують із демографічними змінами, реформами в освітній сфері та іншими соціально-економічними факторами (Гребень, 2021; Майборода, 2018).

Зміна формату та повна модернізація системи професійної освіти створює передумови для сталого розвитку суспільства та підвищення конкурентоспроможності економіки країни. Необхідно не просто підвищувати рівень освіченості здобувачів освіти, а й забезпечити формування в них нового способу мислення, здатного адаптуватися до швидко змінюваних економічних, технологічних, соціальних та інформаційних реалій навколишнього світу.

Нагальність змін у системі професійної освіти віддзеркалюється в нормативно-правовій базі нашої держави, висновках і пропозиціях інноваційних вітчизняних та міжнародних програм та ініціатив. Міністерство освіти і науки України (МОН) у співпраці з Європейським фондом освіти (ETF) досліджує та вдосконалює зміст професійної (професійно-технічної) освіти відповідно до європейських стандартів у межах Туринського процесу з 2010 року. Метою є адаптація професійної освіти до сучасних викликів ринку праці, підвищення якості підготовки кадрів та забезпечення відповідності освітніх програм європейським стандартам.

Здійснення успішної модернізації професійної освіти можливе за умов реалізації різноманітних інноваційних проєктів, одним із яких є створення в закладі освіти цифрового інформаційно-консультативного середовища.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Теоретичні та методичні засади підготовки спеціалістів відповідно до сучасних вимог ринку праці є провідним фокусом дослідження проблем професійної освіти в Україні. Необхідністю сьогодення є врахування інтенсивної диджиталізації освіти, компонентами якої є «...цифрове покоління здобувачів освіти; створення законодавчої бази для цифровізації освіти; ресурсне забезпечення цифровізації освіти, що включає цифрове освітнє середовище ЗВО; підготовка кадрового потенціалу цифрової освіти, що володіє цифровою компетентністю, що включає цифрову грамотність; цифрові педагогічні технології й освітньо значущі цифрові технології» (Гуревич, 2025).

Широке впровадження в наукову та освітню діяльність сучасних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) і мережових рішень відкритого інформаційно-освітнього простору суттєво розширилися завдяки розвитку сервісів хмарних обчислень (Биков, 2018). Дослідники наголошують на необхідності запровадження в освітній процес хмарних технологій, що сприяють трансформації навчального середовища та підвищенню якості загальноосвітньої та професійної підготовки здобувачів освіти. Можливість задіяти можливості диджиталізації для вирішення комунікативної взаємодії в цифровому середовищі є ключовою для соціальної участі, рівності та подолання соціально-економічних і культурних розривів (Bolaños, 2021).

Фахівці Інституту професійно-технічної освіти НАПН України дають таке тлумачення поняття «Інформаційно-освітнє середовище ПТНЗ»: «...це штучно і цілеспрямовано спроектована підсистема освітнього процесу, яка структурно включає змістову (інформаційні, навчальні, методичні ресурси), технологічну (інструменти, засоби ІТ-діяльності і комунікацій), організаційну (організаційні підрозділи) складові та згодом забезпечує відкритість системи підготовки кваліфікованих робітників завдяки об'єднанню учасників педагогічного процесу засобами ІКТ для виконання інформаційної, інтерактивної, комунікаційної, навчальної та інших функцій» (Інформаційно, 2017, с. 19). Важливою функцією є створення умов для диференційованої самоосвітньої діяльності студентів (Марушко, 2023).

Концепція інформаційно-консультаційного середовища навчального закладу, принципи та методологічні підходи, інструментарій педагогічного консультування за допомогою комп'ютерно-орієнтованих методів, прийомів, форм і технологій є у фокусі уваги низки науковців (Брунько, 2021; Скрипник, 2022; Lavrentieva, 2021). Приймаємо за основу виокремлену у дослідженні (Скрипник, 2022) структуру інформаційно-консультаційного середовища як системи, що об'єднує на інформаційному рівні усіх учасників освітнього процесу – адміністрацію, викладачів та здобувачів освіти. Як системному об'єкту, такому середовищу притаманні такі властивості, як цілісність, організованість, структурність, розвиток, стійкість і надійність. Модель організації інформаційно-консультаційного середовища зображена на рис. 1.

Структура інформаційно-консультаційного середовища навчального закладу охоплює такі основні компоненти:

- організаційний – побудова організаційної структури навчального закладу для забезпечення створення, функціонування та розвитку середовища, розробка його нормативно-правової бази;
- технічний – підтримка технічних і технологічних рішень;
- методичний – формування системи навчання здобувачів та персоналу та підготовка методичних рекомендацій для роботи в середовищі;

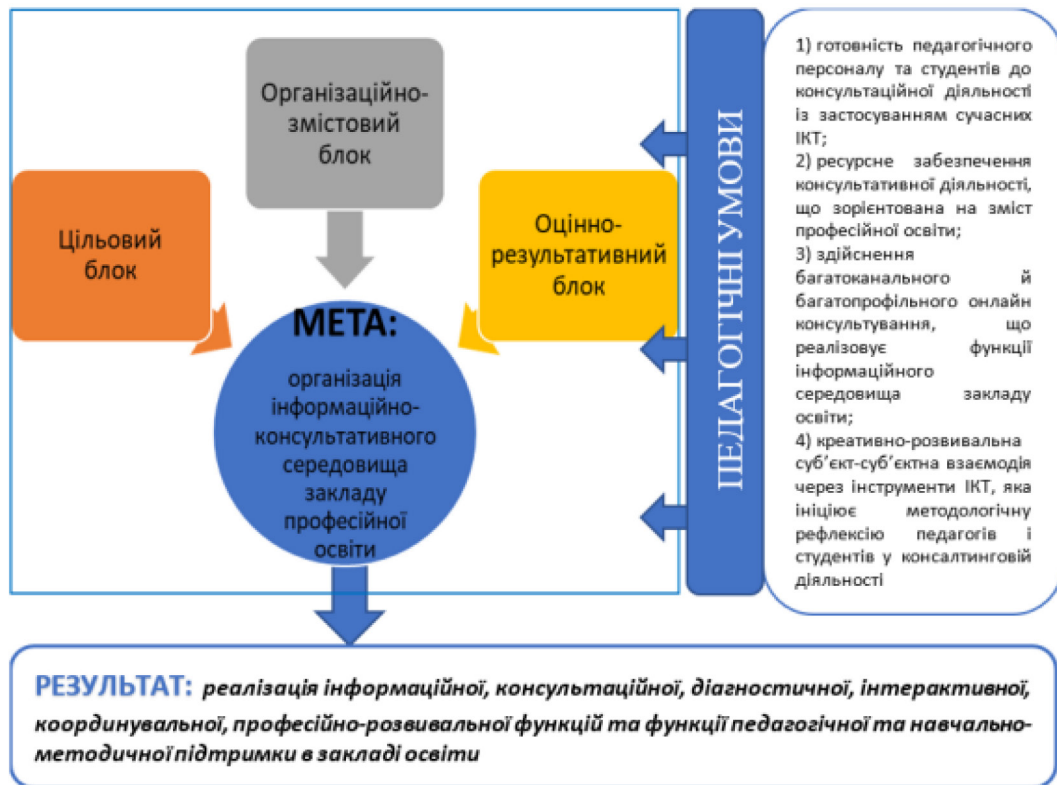


Рис. 1. Модель організації інформаційно-консультативного середовища (Скрипник, 2022)

– ресурсний – розробка, підтримка та модернізація інформаційно-консультативних ресурсів (Lavrentieva, 2021).

Мета статті – проаналізувати функції інформаційно-консультативного середовища закладу професійної освіти.

Методи дослідження – системно-структурний аналіз, узагальнення й систематизація наукових ідей та практичних рішень, SWOT-аналіз.

Виклад основного матеріалу. Інформаційно-консультативне середовище є багатокомпонентним комплексом освітніх ресурсів і технологій, які забезпечують інформатизацію та автоматизацію консультативних послуг. Його функціонування засноване на мультимедійних, гіпертекстових, web та SMART технологіях. Правильно організоване інформаційно-консультативне освітнє середовище в закладі професійної освіти виконує низку важливих функцій, які сприяють ефективному навчанню, професійному розвитку та підтримці педагогів і студентів. Розглянемо кожну з них докладніше, акцентуючи на цифрових інструментах забезпечення даної функції.

1. Інформаційна функція полягає у забезпеченні доступу до актуальної та структурованої інформації про навчальні програми,

кваліфікаційні стандарти, ринок праці та інші важливі аспекти освіти. У локальному вимірі надається поточна актуальна інформація про функціонування даного закладу професійної освіти. Основним джерелом є офіційний вебсайт навчального закладу (Головко, 2024) та його основна освітня онлайн-платформа (Google Classroom, Moodle, Coursera, Prometheus). Для отримання інформації використовують також електронні бібліотеки та бази даних (Національна бібліотека України, Google Scholar). Останніми роками набули поширення чат-боти для швидкого доступу до інформації про навчання (Гулай, 2023).

2. Консультативна функція передбачає надання учням і викладачам кваліфікованих консультацій щодо навчального процесу, вибору професії, кар'єрного розвитку та професійної адаптації. Реалізується у онлайн-консультаціях методистів, викладачів, психологів та кар'єрних консультантів з використанням Zoom, Google Meet, Microsoft Teams. Набули поширення кар'єрні центри при навчальних закладах, що проводять регулярні воркшопи, вебінари та тренінги з професійного розвитку (Сліпчишин, 2024). Форми зворотного зв'язку на сайті або через месенджери (Telegram, Viber)

забезпечують швидкий збір інформації з актуальних питань.

3. Діагностична функція включає моніторинг навчальних досягнень, визначення рівня професійної підготовки та виявлення індивідуальних освітніх потреб учнів. Використовуються онлайн-тести та опитування (Google Forms, Kahoot, Testportal) для оцінки знань і компетентностей, психологічні тестування для визначення професійних нахилів (методики Голланда, тест Кеттелла). Автоматизовані системи моніторингу навчальних досягнень (електронні журнали) суттєво спрощують управління освітнім процесом та моніторинг успішності учнів у закладах професійної освіти. Платформи для збору статистичних даних (SurveyMonkey, Microsoft Power BI) забезпечують науковий підхід до прогнозування навчального процесу.

4. Інтерактивна функція забезпечує гнучкість навчального процесу та можливість дистанційного навчання, зорієнтована на використання сучасних ІКТ-технологій для активної взаємодії учасників освітнього процесу (онлайн-конференції, вебіари, віртуальні лабораторії, інтерактивні симуляції). Ознаками сучасного закладу професійної освіти є використання у навчальному процесі доповненої та віртуальної реальності (VR/AR), віртуальні лабораторії та симулятори (Labster, Phet Colorado), гейміфікація навчання (Quizizz, Classcraft, Duolingo). Соціальні мережі та освітні спільноти (Facebook-групи, Telegram-канали) не тільки забезпечують широке інформування про діяльність освітнього закладу, але й є ефективними майданчиками для обміну думками та враженнями (Кабак, 2023).

5. Координувальна функція забезпечує логічну побудову навчальних програм, контроль виконання навчальних планів і завдань, допомагає ефективно організовувати навчальний процес, узгоджувати роботу викладачів, учнів, адміністрації та роботодавців. Найпоширенішим цифровим інструментом є електронний розклад занять (Google Calendar, MyStudy), який можна інтегрувати у онлайн-щоденники для викладачів і студентів. Використовують також CRM-системи для управління навчальним процесом (Bitrix24, OpenEduCat) та платформи для колективної роботи (Trello, Notion, Slack).

6. Професійно-розвивальна функція сприяє підвищенню кваліфікації як учнів, так

і педагогів шляхом проведення тренінгів, майстер-класів, курсів підвищення кваліфікації (EdEra, Prometheus, ВУМ online), реалізується через співпрацю з підприємствами для здобуття практичного досвіду та ознайомлення з сучасними технологіями. Навчальну вмотивованість здобувачів посилює участь у хакатонах та конкурсах професійної майстерності (WorldSkills Ukraine). Програми стажування та дуальної освіти в партнерстві з підприємствами забезпечують тісний зв'язок із інноваціями у виробництві, а наставництво та менторські програми допомагають у адаптації у професійному середовищі.

7. Методична функція передбачає розробку та впровадження методичних рекомендацій, електронних підручників, навчальних планів, що відповідають сучасним освітнім стандартам. Дана функція інформаційно-консультативного середовища важлива для педагогів у процесі використання новітніх методик навчання, впровадження цифрових інструментів та адаптації до змін в освіті. Передбачено використання зовнішніх методичних порталів та освітніх ресурсів (Profosvita, Edmodo), а також створення банку методичних розробок і навчальних матеріалів у цифровому форматі, формування власних онлайн-бібліотек (інституційний репозитарій). Впровадження STEM-освіти та міждисциплінарних проєктів, участь у міжнародних програмах (ERASMUS, NAWA) наближає заклад професійної освіти до європейського освітнього простору.

Підсумовуючи огляд технологій та цифрових інструментів їх реалізації, доцільних у функціонуванні інформаційно-консультативного середовища закладу професійної освіти, приходимо до висновку про важливість врахування індивідуальних можливостей кожного здобувача, його інтересів, нахилів, накопиченого у навчанні й реальному житті.

Застосуємо SWOT-аналіз, метод стратегічного планування, який допомагає оцінити сильні та слабкі сторони організації (внутрішні фактори), а також можливості та загрози (зовнішні фактори) функціонування інформаційно-консультативного середовища на прикладі державного професійно-технічного навчального закладу «Луцьке вище професійне училище» (табл. 1).

SWOT-матриця інформаційно-консультативного середовища Луцького вищого професійного училища

	Фактор	Значення
1.	Сильні сторони (Strengths)	Сучасний веб-сайт https://lvpu.lutsk.ua/ . Консультативна підтримка в кабінеті практичного психолога та соціального педагога. Змістовна методична сторінка для педагогів. Центр професійної кар'єри. Навчально-практичний центр слюсарної справи. Зручна комунікація між учасниками освітнього процесу. Електронна бібліотека. Реалізація дистанційного, змішаного, мобільного форматів навчання
2.	Слабкі сторони (Weaknesses)	Низька залученість до освітнього процесу зовнішніх стейкхолдерів та експертів галузі. Відсутність інтерактивних опитувальників. Відсутність інформації про реагування адміністрації на проблеми учасників освітнього процесу. Залежність від якості Інтернет-з'єднання та рівня комп'ютерної техніки закладу освіти та здобувачів
3.	Можливості (Opportunities)	Підвищення інтернаціоналізації закладу освіти. Вдосконалення цифрової компетентності учасників освітнього процесу. Функціонування на базі закладу інноваційних структур професійної майстерності. Автоматизація та осучаснення освітнього процесу й консультативних послуг. Використання чат-ботів для консультування
4.	Загрози (Threats)	Можливість хакерських атак і використання особистих даних. Некомпетентне адміністрування системи. Зниження соціалізації учнівської молоді. Зведення до мінімуму консультаційної підтримки через особисте спілкування. Неможливість формування фахових компетентностей та реалізації практичної підготовки через обмеження воєнного стану.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У результаті аналізу теоретичних джерел та практики провадження освітньої діяльності у закладі професійної освіти дійшли висновку, що правильно організоване та функціональне цифрове середовище закладу здатне автоматизувати та осучаснити освітній процес та зробити його більш доступним та цікавим для молоді. Поєднання високої економічної ефективності та гнучкості в організації навчання, широке використання інформаційних ресурсів, що відповідають запитам та потребам суб'єктів освітнього процесу, суттєве розширення можливостей традиційних форм навчання та виховання, а також створення нових ефективних форм освітньої взаємодії – це ті складові якісної освіти, які забезпечує єдине

інформаційно-консультативне середовище закладу освіти. Ці процеси, зі свого боку, сприяють підвищенню рівня цифрової компетентності, формування інтелектуально та творчо розвиненої особистості здобувачів освіти, педагогів і менеджерів освітнього закладу.

Можемо констатувати, що інформаційно-консультативне середовище закладу професійної освіти є складовою інформаційного простору, в межах якого стає можливим обмін інформацією та консультативна підтримка суб'єктів освітнього процесу та інших зацікавлених сторін за допомогою цифрових технологій. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку цифрових консультантів (чат-ботів), що сприятимуть персоналізації інформаційно-консультативного середовища.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Биков В.Ю., Гуржій А.М., Шишкіна М.П. Концептуальні засади формування і розвитку хмаро орієнтованого навчально-наукового середовища закладу вищої педагогічної освіти. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми* : зб. наук. пр. Київ-Вінниця : ТОВ фірма «Планер», 2018. Вип. 50. С. 20–25.
2. Брунько А., Цибок В. Інформаційно-ресурсний центр як інноваційний структурний підрозділ коледжу. *Професійна освіта*. 2021. № 1. С. 45–47.
3. Головка О.А. Інтеграція вебсайту та соціальних мереж як стратегія сучасної комунікації університету. *Обрії друкарства*. 2024. № 2 (16). С. 233–241.

4. Гребень С. Проблеми та перспективи розвитку професійної технічної освіти в Україні. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2021. № 3(63). С. 125–130.
5. Гулай О.І., Карамач В.А. Чат-бот у навчальному процесі / Тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції з проблем вищої освіти і науки «Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві (ІТОНВ-2023) (25–26 травня 2023 року). Луцьк : ЛНТУ, 2023. С. 94–96.
6. Гуревич Р.С., Воєвода А.Л., Коношевський О.Л., Коваль, М.С., Кусій М.І. Диджиталізація освіти на сучасному етапі розвитку суспільства. *Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training Methodology Theory Experience Problems*. 2025. Вип. 74. С. 5–26.
7. *Інформаційно-освітнє середовище професійно-технічного навчального закладу*: навчальний посібник / наук. ред. П.Г.Лузана. Київ : ІПТО НАПН, 2017. 124 с.
8. Кабак В.В., Горбатюк Р.М. Практичні аспекти застосування цифрових технологій в процесі підготовки майбутніх фахівців професійної освіти. *Digital transformation and technologies for sustainable development all branches of modern education, science and practice* [Electronic resource]: International Scientific and Practical Conference Proceeding, January 26, 2023. International Academy Applied Sciences in Lomza (Poland) – State Biotechnological University (Ukraine). Publishing house: MANS w Łomży, Lomza, Poland, 2023. Part 2. P. 43–47.
9. Майборода Т.М. Аналіз державного регулювання професійної (професійно-технічної) освіти в напрямку її оптимізації. *Соціально-економічний розвиток регіонів в контексті міжнародної інтеграції*. 2018. № 29(18). Том 2. С. 32–38.
10. Марушко Л. Інформаційне освітнє середовище ЗВО як дієвий інструмент диференціації та індивідуалізації підготовки майбутніх учителів природничих спеціальностей до професійної діяльності. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2023. № 3. С. 95–101.
11. Сліпчишин Л., Мелько М. Роль центрів професійної кар'єри в особистісному і професійному становленні майбутніх фахівців. *Нові технології навчання*. 2024. Вип. 98. С. 211–217.
12. Скрипник Л.М. Методика організації інформаційно-консультативного середовища закладу професійної освіти. *Адаптивне управління: теорія і практика. Серія Педагогіка*. 2022. Том 14. № 27. doi: [https://doi.org/10.33296/2707-0255-14\(27\)-10](https://doi.org/10.33296/2707-0255-14(27)-10)
13. Радкевич В.О. Сучасні тенденції розвитку професійної освіти. Актуальні проблеми технологічної і професійної освіти. Матер. Міжнар. наук.-практ. конф., 14 травня 2020 р. Глухів : Глухівський НПУ ім. О.Довженка, 2020. С. 61–66.
14. Bolaños, F., & Salinas, Á. (2021). Secondary vocational education students' expressed experiences of and approaches to information interaction activities within digital environments: A Phenomenographic study. *Education and Information Technologies*, 26, 1955–1975.
15. Lavrentieva, O., Horbatiuk, R., Skripnik, L., Kuchma, O., Penia, V., & Pahuta, M. (2021, March). Theoretical and methodological bases of designing the educational institution information and consulting environment. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1840, No. 1, p. 012060). IOP Publishing.

REFERENCES:

1. Bykov, V.Y., Gurzhiy, A.M., & Shyshkina, M.P. (2018). Kontseptualni zasady formuvannia i rozvytku khmaroorientovanoho navchalno-naukovoho seredovyscha zakladu vyshchoi pedahohichnoi osvity [Conceptual foundations for the formation and development of a cloud-based educational and scientific environment in higher pedagogical education institutions]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii ta innovatsiini metodyky navchannia u pidhotovtsi fakhivtsiv: metodolohiia, teoriia, dosvid, problemy – Modern Information Technologies and Innovative Teaching Methods in Professional Training: Methodology, Theory, Experience, Problems*, (50), 20–25.
2. Brunko, A., & Tsybok, V. (2021). Informatsiino-resursnyi tsentr yak innovatsiinyi strukturnyi pidrozdil koledzhu [Information and resource center as an innovative structural unit of the college]. *Profesiina Osvita – Professional Education*, (1), 45–47.
3. Holovko, O.A. (2024). Intehratsiia vebсайtu ta sotsialnykh merezh yak stratehiia suchasnoi komunikatsii universytetu [Integration of a website and social media as a strategy for modern university communication]. *Obrii Drukarstva – Horizons of Printing*, 2(16), 233–241.
4. Greben, S. (2021). Problemy ta perspektyvy rozvytku profesiinoi tekhnichnoi osvity v Ukraini [Problems and prospects for the development of vocational and technical education in Ukraine]. *Vcheni Zapyzky Universytetu “KROK” – Scientific Notes of the KROK University*, 3(63), 125–130.
5. Hulai, O.I., & Karamach, V.A. (2023). Chat-bot u navchalnomu protsesi [Chatbot in the educational process]. *Tezy dopovidei IX Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii z problem vyshchoi osvity i nauky “Informatsiini tekhnolohii v osviti, nautsi i vyrobnytstvi” (ITONV-2023) (25–26 travnia 2023 roku) (pp. 94–96)*. Lutsk: Viddil imidzhu ta promotsii LNTU.

6. Hurevych R. S., Voievoda A. L., Konoshevskiy O. L., Koval, M. S., & Kusii M. I. (2025). Dydzhytalizatsiia osvity na suchasnomu etapi rozvytku suspilstva [Digitalisation of education at the current stage of society development]. *Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training Methodology Theory Experience Problems*, 74, 5–26.
7. *Informatsiino-osvitnie seredovyshe profesiino-tekhnichnoho navchalnoho zakladu: navchalnyi posibnyk / [Information and educational environment of a vocational educational institution: a study guide] / nauk. red. P. H. Luzana. Kyiv: IPTO NAPN 2017.*
8. Kabak, V. V., & Horbatiuk, R. M. (2023). Praktychni aspekty zastosuvannya tsyfrovyykh tekhnolohii v protsesi pidhotovky maibutnikh fakhivtsiv profesiinoi osvity [Practical aspects of digital technologies application in the process of training future vocational education specialists]. *Digital transformation and technologies for sustainable development all branches of modern education, science and practice* [Electronic resource]: International Scientific and Practical Conference Proceeding, January 26, 2023. International Academy Applied Sciences in Lomza (Poland) – State Biotechnological University (Ukraine), 2, (pp. 43–47). Publishing house: MANS w Łomży, Lomza, Poland.
9. Maiboroda, T. M. (2018). Analiz derzhavnoho rehuliuвання profesiinoi (profesiino-tekhnichnoi) osvity v napriamku yii optymizatsii [Analysis of the state regulation of vocational (vocational-technical) education in the direction of its optimisation]. *Sotsialno-ekonomichniy rozvytok rehioniv v konteksti mizhnarodnoi intehtatsii – Socio-economic development of regions in the context of international integration*, 29(18), part 2, 32–38.
10. Marushko, L. (2023). Informatsiine osvitnie seredovyshe ZVO yak diievyi instrument dyferentsiatsii ta individualizatsii pidhotovky maibutnikh uchyteliv pryrodnychyykh spetsialnostei do profesiinoi diialnosti [Digital educational environment of higher education institutions as an effective tool of differentiation and individualization of the preparation of future teachers of natural science specialties for professional activity]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 95–101.
11. Slipchyshyn, L., & Melko, M. (2024). Rol tsentriv profesiinoi kariery v osobystisnomu i profesiinomu stanovleni maibutnikh fakhivtsiv [The role of professional career centres in the personal and professional development of future specialists]. *Novi tekhnolohii navchannia – New learning technologies*, 98, 211–217.
12. Skrypyk, L. M. (2022). Metodyka orhanizatsii informatsiino-konsultatyvnoho seredovysheha zakladu profesiinoi osvity [Methods of organising the information and consulting environment of a vocational education institution]. *Adaptyvne upravlinnia: teoriia i praktyka. Serii Pedagogika – Adaptive management: theory and practice. Series Pedagogy*, 14(27).
13. Radkevych, V. O. (2020). Suchasni tendentsii rozvytku profesiinoi osvity [Modern trends in the development of vocational education]. Aktualni problemy tekhnolohichnoi i profesiinoi osvity. Mater. Mizhnar. nauk.-prakt. konf., 14 travnia 2020 r. Hlukhiv: Hlukhivskiy NPU im. O. Dovzhenka, (pp. 61–66).
14. Bolaños, F., & Salinas, Á. (2021). Secondary vocational education students' expressed experiences of and approaches to information interaction activities within digital environments: A Phenomenographic study. *Education and Information Technologies*, 26, 1955–1975.
15. Lavrentieva, O., Horbatiuk, R., Skripnik, L., Kuchma, O., Penia, V., & Pahuta, M. (2021, March). Theoretical and methodological bases of designing the educational institution information and consulting environment. *Journal of Physics: Conference Series*, 1840(1), 012060.

УДК 378.147:61-057.875:81'243

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-14>

Михайло ДЕМЯНЧУК

доктор педагогічних наук, доцент, доцент кафедри медико-профілактичних дисциплін та лабораторної діагностики, Комунальний заклад вищої освіти «Рівненська медична академія» Рівненської обласної ради, вул. М. Карнаухова, 53, м. Рівне, Україна, 33018

ORCID: 0000-0001-8729-5144

Олена ГАШИНСЬКА

кандидат медичних наук, доцент, доцент кафедри медико-профілактичних дисциплін та лабораторної діагностики, Комунальний заклад вищої освіти «Рівненська медична академія» Рівненської обласної ради, вул. М. Карнаухова, 53, м. Рівне, Україна, 33018

ORCID: 0000-0003-1818-578x

Олена ГОРСЬКА

старший викладач кафедри медико-профілактичних дисциплін та лабораторної діагностики, завідувач відділення післядипломної освіти молодших медичних та фармацевтичних спеціалістів, Комунальний заклад вищої освіти «Рівненська медична академія» Рівненської обласної ради, вул. М. Карнаухова, 53, м. Рівне, Україна, 33018

ORCID: 0000-0003-2190-4589

Бібліографічний опис статті: Демянчук, М., Гашинська, О., Горська, О. (2025). Можливості особистісно-орієнтованого підходу в формуванні комунікативної компетентності студентів медичних коледжів. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 102–108, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-14>

МОЖЛИВОСТІ ОСОБИСТІСНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ В ФОРМУВАННІ КОМУНІКАТИВНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ СТУДЕНТІВ МЕДИЧНИХ КОЛЕДЖІВ

Мета роботи. Серед основних цілей професійної медичної освіти значна роль відводиться формуванню комунікативної компетентності, що, окрім формування базових навичок, передбачає опанування компетенцій щодо визнання цінності та демонстрації поваги до міжсуб'єктної диференціації, толерантність та критичне мислення. Особливої значущості в даному контексті набуває особистісно-орієнтований методологічний підхід, що розміщує у центрі освітньої діяльності власне людину, з її перевагами та індивідуальними особливостями. Метою статті є аналіз потенціалу особистісно-орієнтованого підходу до формування комунікативної компетентності студентів медичних коледжів.

Методологія. Дослідження відноситься до категорії описових і включає тематичні дослідження та аналіз вторинних даних. У процесі дослідження було застосовано структурно-логічний метод, аналіз і синтез, порівняння, дедукцію.

Наукова новизна. У статті розглянуто концепцію формування міжпредметних зв'язків, що володіє функціоналом інтегрованого підходу до розвитку комунікативних навичок. Встановлено, що досліджуваний процес вимагає формування у студентів стійкого уміння адекватного взаєморозуміння, прагнення демократизації взаємин з учасниками професійного комунікаційного процесу. Закцентовано, що проєкти особистісно-орієнтованої концепції виступають важливими навчальними інструментами педагогічної стратегії формування навичок життєвих компетентностей, у тому числі – комунікативних навичок, крос-культурності та професійної етики.

Висновки. Обґрунтовано, що сучасний суспільний простір вимагає від медиків особливої уваги до концепції культури толерантності, пошуку шляхів її розвитку. Доведено, що ефективне застосування потенціалу інтегрованих занять та інноваційного цифрового інструментарію в межах стратегії особистісно-орієнтованого навчання сприяє оптимізації пізнавальної діяльності, поступу критичного мислення та стійкому розвитку естетичного світобачення, що в синергії забезпечує успішне формування комунікативної компетентності в процесі здобуття професійної медичної освіти в коледжі.

Ключові слова: особистісно-орієнтований підхід, комунікативні здібності, комунікативна компетентність, інноваційні методи, медичний коледж, інтеграція, професійна компетентність.

Mykhailo DEMIANCHUK

Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Medical Prevention Disciplines and Laboratory Diagnostics, Municipal Institution of Higher Education "Rivne Medical Academy" of the Rivne Region Council, 53 M. Karnaukhov str., Rivne, Ukraine, 33018

ORCID: 0000-0001-8729-5144

Olena GASHYNSKA

Candidate of Medical Sciences, Associate Professor at the Department of Medical Prevention Disciplines and Laboratory Diagnostics, Municipal Institution of Higher Education «Rivne Medical Academy» of the Rivne Region Council, 53 M. Karnaukhov str., Rivne, Ukraine, 33018

ORCID: 0000-0003-1818-578x

Olena GORSKA

Senior Lecturer at the Department of Medical Prevention Disciplines and Laboratory Diagnostics, Head of the Department of Postgraduate Education of Junior Medical and Pharmaceutical Specialists, Municipal Institution of Higher Education «Rivne Medical Academy» of the Rivne Region Council, 53 M. Karnaukhov str., Rivne, Ukraine, 33018

ORCID: 0000-0003-2190-4589

To cite this article: Demianchuk, M., Gashynska, O., Gorska, O. (2025). *Mozhlyvosti osobystisno-oriientovanoho pidkhodu v formuvanni komunikatyvnoi kompetentnosti studentiv medychnykh koledzhiv* [Possibilities of a personality-oriented approach in the formation of communicative competence of medical students]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 102–108, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-14>

POSSIBILITIES OF A PERSONALITY-ORIENTED APPROACH IN THE FORMATION OF COMMUNICATIVE COMPETENCE OF MEDICAL COLLEGE STUDENTS

Purpose of the work. Among the main goals of professional medical education, a significant role is given to the formation of communicative competence, which, in addition to the formation of basic skills, involves the mastery of competencies in recognizing the value and demonstrating respect for intersubject differentiation, tolerance and critical thinking. Of particular importance in this context is the personality-oriented methodological approach, which places the person himself, with his advantages and individual characteristics, at the center of educational activity. The purpose of the article is to analyze the potential of a personality-oriented approach to the formation of communicative competence of students of medical colleges.

Methodology. The study belongs to the category of descriptive and includes case studies and analysis of secondary data. In the process of research, the structural-logical method, analysis and synthesis, comparison, deduction were used.

Scientific novelty. The article considers the concept of the formation of interdisciplinary connections, which has the functionality of an integrated approach to the development of communicative skills. It is established that the studied process requires the formation of a stable ability of adequate mutual understanding in students, the desire to democratize relationships with participants in the professional communication process. It is emphasized that projects of a personality-oriented concept are important educational tools of the pedagogical strategy for the formation of life skills, including communication skills, cross-culturality and professional ethics.

Conclusions. It is substantiated that the modern social space requires from physicians special attention to the concept of a culture of tolerance, the search for ways of its development. It is proven that the effective use of the potential of integrated classes and innovative digital tools within the framework of the strategy of personality-oriented learning contributes to the optimization of cognitive activity, the advancement of critical thinking and the sustainable development of an aesthetic worldview, which in synergy ensures the successful formation of communicative competence in the process of obtaining professional medical education in college.

Key words: person-centered approach, communication skills, communication competence, innovative methods, medical college, integration, professional competence.

Актуальність проблеми. Сучасне освітнє середовище передбачає імплементацію інноваційних підходів та інструментів, які дають змогу

інтенсифікувати позитивну мотивацію здобувачів освіти щодо оволодіння новими уміннями, навичками та знаннями. Зазначене зумовлює

актуалізацію проблематики методичного забезпечення досліджуваного процесу. Окрім того, особливої ваги на сьогодні набувають тенденції розвитку комунікативної культури майбутніх медиків, їх професійної етики.

У даному контексті значущості набуває потенціал особистісно-орієнтованого підходу в освіті. При ефективному методологічному забезпеченні навчального процесу запропонований підхід може стати прогресивним проливом в розвитку концепції підвищення якості освіти, розвитку її в напрямку інноваційності та компліментарності запитам соціуму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання практичного використання засобів особистісно-орієнтованого підходу для формування комунікативної компетентності в межах професійної освіти знаходять відображення у результатах наукових напрацювань низки сучасних дослідників. Зокрема, в працях Ромін та ін. (2021), Маг та ін. (2022) досліджено варіативність практичного інструментарію міжпредметної взаємодії в контексті індивідуалізації навчання в аспектах формування комунікативної компетентності та професійної етики.

Інші учені (Скотна & Лялюк, 2020; Недельська та ін., 2024) аналізують новітню векторність методології особистісно-орієнтованого підходу в контексті формування креативності та критичного мислення, що слугують передумовами формування стійкої професійної етики та комунікативних навичок. На продовження, вчені Рамірез-Монтойя та ін. (2021) досліджують можливості залучення інноваційних рішень інформаційно-комунікаційних технологій до навчального процесу.

Специфіку досліджуваному процесу надає сучасна система цінностей молодого покоління. Як переконують учені Хуанг та Корнелл (2021), Лисенко та ін. (2020), сукупність сформованих якостей суттєво впливає на моральну спрямованість особистості фахівця, а ціннісні орієнтації детермінуються конкретними формами життєдіяльності. Тобто, цілеспрямований вплив особистісно-орієнтованої концепції навчання, з позиції автора, може чинити синергійний вплив на формування ціннісної основи особистості, у тому числі, в контексті формування комунікативних умінь та професійної толерантності.

Структурно-функціональна модель процесу формування комунікативної компетентності

на основі концепції індивідуалізації освіти аналізується в роботах окремих зарубіжних учених Жимковяк та ін. (2021), Хаукрідж (2022). Водночас, питання практичних можливостей особистісно-орієнтованого підходу в даному контексті, переважно, досліджені фрагментарно, що актуалізує тематику даного дослідження.

Мета дослідження. Метою статті є аналіз потенціалу особистісно-орієнтованого підходу до формування комунікативної компетентності студентів медичних коледжів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Головним завданням сучасної освітньої концепції стає всебічний розвиток особистості, яка володіє високим рівнем професійної етики, естетичним світобаченням, вдосконаленим психологічним устроєм. Фрагментарність традиційної методології освіти в контексті формування комунікативних навичок у студентів професійної освіти призвела до складнощів застосування отриманих знань поза межами навчальної дисципліни, водночас як сучасне суспільство прагне до всебічного розвитку та інтегрованості (Бурбулес та ін., 2020). Зазначене особливо актуальне в межах майбутньої фахової діяльності медиків.

З-поміж основних методичних принципів формування комунікативної компетентності студентів медичних коледжів засобами особистісно-орієнтованої освітньої концепції варто зацентувати наступні:

1) поєднання різних форм, методів та інструментів освітнього процесу в контексті формування комунікативних компетенцій;

2) залучення міждисциплінарних зв'язків в освітній процес у контексті здобуття необхідних навичок;

3) практико-орієнтоване навчання професійного спрямування;

4) трансфер інноваційних технологій для формування методологічних цільових кейсів з формування комунікативної компетентності.

Власне, методологія формування комунікативних навичок в процесі навчання за принципом особистісно-орієнтованого підходу включає етапи:

1) попередньої ідентифікації основних проблем та викликів в досліджуваній сфері;

2) формування методологічних та теоретичних принципів;

3) ідентифікації основних завдань та загальної мети процесу;

4) формування педагогічної моделі міждисциплінарної інтеграції, з виокремленням системних взаємозалежностей, виділенням основних параметрів та відповідних критеріїв їх оцінки;

5) інтеграції моделі до освітнього процесу на основі принципів послідовності та системності;

6) інтерпретації результатів застосування моделі, визначення вузьких місць та шляхів вдосконалення концепції.

Загальним методологічним принципом комунікативної компетентності є позиція гуманізму та людиноцентризму. Загальновідомо, що будь-яка психічна діяльність людини пов'язана із базовими асоціаціями, котрі формуються у мозку та поєднуються між собою в складніші асоціативні ряди та системи (Рейз та ін., 2021). Із огляду на це, міждисциплінарні асоціації уможливають гармонійний розвиток системного мислення студентів (Сінамбела та ін., 2020). Реалізація міжпредметних зв'язків стимулює їх до безперервного вдосконалення засвоєних знань, опанування нових навичок та компетенцій, а також прагнення практичного використання отриманого досвіду.

Ще однією важливою умовою ефективного розвитку навичок комунікативної компетентності у студентів є трансформація позиції педагога до самого себе як єдиного вірного джерела інформації. Згідно з вимогами сучасної освітньої концепції, викладач повинен займати позицію, за якої стимулює продукування здобувачами освіти думок, відмінних від власних. Мета педагогічної діяльності, при цьому, вбачається у опануванні студентами умінь ефективного опрацювання інформації, позиціонуючи дефініцію критичного типу мислення як самостійне, індивідуальне утворення (Хернандез-де-Менендес та ін., 2020).

Завдання педагога, при цьому, вбачається у формуванні превентивної можливості для неквапливого формулювання відповіді студентом. Орім того, педагог повинен нівелювати стереотипні переконання щодо залучення до навчального процесу різноманітних гаджетів, адже цифрова комунікація наразі позиціонується невід'ємною частиною комунікативних навичок.

Інтеграція інноваційних навчальних методик модульного, дистанційного, змішаного навчання сприятиме розвитку креативності та мотивуватиме до індивідуалізації освітнього процесу в межах особистісно-орієнтованого навчання (Абдрахман та ін., 2022). Зокрема, можуть бути успішно використані такі методи, як:

- метод «спроб і помилок», що мотивує до самостійного пошуку відповідей на проблемні питання;

- взаємонавчання у процесі спільного розв'язання поставлених задач;

- залучення світового досвіду шляхом відвідування виставок, проєктів тощо онлайн;

- використання інноваційних цифрових онлайн-ресурсів, освітніх майданчиків, мобільних додатків.

Особливим потенціалом наділені імерсивні технології, що передбачають залучення інструментарію віртуальної та змішаної реальності, а також практико-орієнтоване навчання. Зазначені методи дозволяють відтворювати реальні ситуації, з якими зустрічатиметься студент в процесі майбутньої фахової діяльності. Це дозволяє студентам не лише зрозуміти специфіку власних поведінкових стратегій реагування, але й сформувати та практично відпрацювати навички комунікації.

Також, доцільно інтегрувати елементи інтерактивного навчання, за якого студенти володіють повним доступом до навчальних матеріалів через Інтернет, у вигляді доступних навчальних матеріалів, без просторово-часових обмежень. Також, перевагою є можливість персонального обрання часового відрізка та варіації об'єднання студентів у групи. При цьому, цифровий контент не являє собою оцифрований підручник, а синтезує різнопланові інтерактивні можливості опрацювання навчального матеріалу (Гуту & Богіян, 2019). Здобувачі освіти, у процесі активної взаємодії з цифровим контентом, формують нові ресурси, обмінюються досвідом, розміщують у персональному цифровому середовищі результати навчальної діяльності, що підсилює ефективність процесу формування навичок комунікації.

При цьому, педагог отримує можливість організувати освітній процес за зразком змішаної технології, поєднуючи онлайн-навчання та індивідуальну роботу. Таким чином вдається досягнути актуальних концептів персоніфікованого

навчання та організувати проекти ефективної взаємодії здобувачів освіти. Очікувана ефективність особистісно-орієнтованого підходу вимагає поєднання традиційної методології, інноваційних рішень та забезпечення сприятливого психологічного середовища в межах середовища. При цьому, педагог повинен володіти адаптивністю, не скутою догмами, що дозволяє інтенсифікувати процес опанування навичок комунікації, критичного мислення та естетичної культури (Сокол та ін., 2021).

На основі вищезазначеного варто виділити основні компоненти методичної основи застосування особистісно-орієнтованого підходу в контексті фокусу формування комунікативної компетентності студентів медичних коледжів:

- мотиваційна складова (усвідомлення необхідності в апгрейді цільових навчальних технологій);
- змістовно-процесуальна складова (педагогічно-методологічне підґрунтя інтеграції на різних етапах навчальної діяльності);
- конструктивна складова (практико-орієнтована навчальна концепція) (Тангіров, 2022).

Вбачається за доцільне запропонувати диференціацію рівнів формування комунікативної компетентності у межах особистісно-орієнтованого підходу:

- 1) загально-користувальницький, що передбачає опанування узагальнених універсальних компетенцій з комунікативної взаємодії, толерантності, визнання цінності та демонстрації поваги до міжсуб'єктної диференціації;
- 2) загально-професійний, що передбачає усвідомлене формування у студентів стійкого уміння адекватного взаєморозуміння, прагнення демократизації взаємин з учасниками професійного комунікативного процесу;
- 3) предметно-орієнтований, котрий передбачає оптимізацію вузькопрофільної професійної діяльності на основі критичного мислення та естетичного світобачення, що в синергії забезпечує успішне практичне виявлення високого рівня комунікативних навичок, професійної етики, толерантності в процесі майбутньої професійної діяльності.

Варто додати, що методологічні основи особистісно-орієнтованого підходу вимагають трансферу цифрових та інтерактивних педагогічних засобів. Останні дозволяють розширити функціонал освітнього процесу в контексті цифрових компетенцій, навичок критичного аналізу інформації, формування крос-культурної та комунікативної компетентності.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Сучасний освітній простір вимагає особливої уваги до концепції культури комунікації, професійної етики та толерантності, пошуку шляхів їх розвитку, розроблення та адаптації інноваційних технологій та методик. Проекти особистісно-орієнтованого підходу виступають важливими методичними інструментами освітньої стратегії розвитку комунікативної компетентності студентів медичних коледжів. Особистісно-орієнтований підхід – це навчання, центром якого є особистість студента, його самобутність, самоцінність. Ефективне застосування потенціалу інтегрованих занять в межах даного підходу сприяє оптимізації пізнавальної діяльності, поступу критичного мислення та розвитку стійких комунікативних навичок.

Основними методичними принципами формування комунікативних здібностей у студентів медичних коледжів засобами особистісно-орієнтованого підходу є створення ефективного міждисциплінарного освітнього середовища та трансфер інноваційних технологій, поєднання різних форм, методів та інструментів освітнього процесу. Також, доцільно інтегрувати елементи інтерактивного навчання, за якого студенти володіють повним доступом до навчальних матеріалів через Інтернет, у вигляді доступних навчальних матеріалів, без просторово-часових обмежень. Загалом, особисто-орієнтований підхід дозволяє підвищити рівень вмотивованості студентів, стимулює розвиток здатності до безперервної самоосвіти, їх адаптивність та толерантність, що забезпечує формування стійких навичок ефектively професійної комунікації.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Romijn B., Slot P., Leseman P. Increasing teachers' intercultural competences in teacher preparation programs and through professional development: A review. *Teaching and Teacher Education*. 2021. № 98. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2020.103236>.

2. Magee M., Kuijpers M., Runhaar P. How vocational education teachers and managers make sense of career guidance. *British Journal of Guidance & Counselling*. 2022. № 50(2). Pp. 273–289. DOI: <https://doi.org/10.1080/03069885.2021.1948970>
3. Скотна Н.В., Лялюк Г.М. Особистісно-орієнтований підхід до реалізації індивідуальної освітньої траєкторії здобувача вищої освіти. *Педагогічна освіта: теорія і практика*. 2020. № 28. С. 393–403.
4. Недельська С., Самохін І., Кряжев О., Бессікало Т., Кляцька Л. Особистісно-орієнтований підхід до навчання і виховання студентів медичного факультету. *Соціально-етичні та деонтологічні проблеми сучасної медицини (немедичні проблеми в медицині) : зб. матеріалів V міжнар. наук.-практ. конференції, (28–29 лютого 2024 р)*. Запоріжжя : ЗДМФУ, 2024. С. 151–152.
5. Ramírez-Montoya M. S., Andrade-Vargas L., Rivera-Rogel D., Portuquez-Castro M. Trends for the Future of Education Programs for Professional Development. *Sustainability*. 2021. № 13(13). <https://doi.org/10.3390/su13137244>
6. Huang F., Cornell D. Teacher Support for Zero Tolerance Is Associated With Higher Suspension Rates and Lower Feelings of Safety. *School Psychology Review*. 2021. № 50(2). Pp. 388–405. DOI: <https://doi.org/10.1080/2372966X.2020.1832865>
7. Lysenko N., Shtefan L., Kholodniak O. Teaching tolerance at school: the experience of modern French education system. *Journal of Liberty and International Affair*. 2020. № 6 (1). Pp. 129–138. URL: <https://www.cceol.com/search/article-detail?id=853345>
8. Szymkowiak A., Melović B., Dabić M., Jeganathan K., Kundi G. S. Information technology and Gen Z: The role of teachers, the internet, and technology in the education of young people. *Technology in Society*. 2021. № 65. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101565>
9. Hawkrigde D. *New information technology in education*. Routledge, 2022. <https://doi.org/10.4324/9781003312826>
10. Burbules N. C., Fan G., Repp P. Five trends of education and technology in a sustainable future. *Geography and sustainability*. 2020. № 1(2). P. 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.05.001>
11. Reis D. A., Fleury A. L., Carvalho M. M. Consolidating core entrepreneurial competences: toward a meta-competence framework. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*. 2021. № 27(1). <https://doi.org/10.1108/IJEBr-02-2020-0079>
12. Sinambela E. A., Mardikaningsih R., Arifin S., Ayu H. D. Development of Self Competence and Supervision to Achieve Professionalism. *Journal of Islamic Economics Perspectives*. 2020. № 1(2). <https://doi.org/10.35719/jiep.v1i2.13>
13. Hernandez-de-Menendez M., Morales-Menendez R., Escobar C. A. Competencies for Industry 4.0. *Int J Interact Des Manuf*. 2020. № 14. P. 1511–1524. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00716-2>
14. Abdrakhman G., Issabekova G., Kudabayeva P. Multiculturalism As A Pedagogical Category Of Integrative-Modular Approach. *Education Journal for Educators, Teachers and Trainers*. 2022. № 13(1). С. 126–140. DOI: <https://doi.org/10.47750/jett.2022.13.01.015>
15. Gutu V., Boghian I. A Bidimensional Psycho-pedagogical Model for Tolerance Education. *Romanian Journal for Multidimensional Education/Revista Romaneasca pentru Educatie Multidimensionala*. 2019. № 11(4).
16. Sokol M., Galya R., Khrystyna S., Hvozdyak O. Tolerance in the communicative culture of modern educational manager. *Propósitos y representaciones*. 2021. № 9(2). URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8108857>
17. Tangirov E. S. Mechanisms of educational study of students on the basis of modern pedagogical technologies. *Spectrum Journal of Innovation, Reforms and Development*. 2022. № 4. Pp. 247–250. URL: <https://sjird.journalspark.org/index.php/sjird/article/view/108>

REFERENCES:

1. Romijn, B., Slot, P., & Leseman, P. (2021). Increasing teachers' intercultural competences in teacher preparation programs and through professional development: A review. *Teaching and Teacher Education*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2020.103236>.
2. Magee, M., Kuijpers, M., & Runhaar, P. (2022). How vocational education teachers and managers make sense of career guidance. *British Journal of Guidance & Counselling*, 50(2), 273–289. DOI: <https://doi.org/10.1080/03069885.2021.1948970>
3. Skotna, N. V., & Lialuk, H. M. (2020). Osobystisno-orientovanyi pidkhid do realizatsii indyvidualnoi osvitnoi traiektorii zdobuvacha vyshchoi osvity [A personality-oriented approach to the implementation of the individual educational trajectory of a higher education student]. *Pedahohichna osvita: teoriia i praktyka*, 28, 393–403. [in Ukrainian]
4. Nedelska, S., Samokhin, I., Kriazhev, O., Bessikalo, T., & Kliatska, L. (2024). Osobystisno-orientovanyi pidkhid do navchannia i vykhovannia studentiv medychnoho fakultetu [Personality-oriented approach to teaching and education of medical students]. *Sotsialno-etychni ta deontolohichni problemy suchasnoi medytsyny (nemedychni problemy v medytsyni) : zb. materialiv V mizhnar. nauk.-prakt. konferentsii, (28–29 liutoho 2024 r)*. Zaporizhzhia : ZDMFU, 151–152. [in Ukrainian]

5. Ramírez-Montoya, M. S., Andrade-Vargas, L., Rivera-Rogel, D., & Portuguese-Castro, M. (2021). Trends for the Future of Education Programs for Professional Development. *Sustainability*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/su13137244>
6. Huang, F., & Cornell, D. (2021). Teacher Support for Zero Tolerance Is Associated With Higher Suspension Rates and Lower Feelings of Safety. *School Psychology Review*, 50(2), 388–405. DOI: <https://doi.org/10.1080/2372966X.2020.1832865>
7. Lysenko, N., Shtefan, L., & Kholodniak, O. (2020). Teaching tolerance at school: the experience of modern French education system. *Journal of Liberty and International Affair*, 6(1), 129–138. Retrieved from <https://www.cceol.com/search/article-detail?id=853345>
8. Szymkowiak, A., Melović, B., Dabić, M., Jeganathan, K., & Kundi, G. S. (2021). Information technology and Gen Z: The role of teachers, the internet, and technology in the education of young people. *Technology in Society*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101565>
9. Hawkridge, D. (2022). *New information technology in education*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003312826>
10. Burbules, N. C., Fan, G., & Repp, P. (2020). Five trends of education and technology in a sustainable future. *Geography and sustainability*, 1(2), 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.05.001>
11. Reis, D. A., Fleury, A. L., & Carvalho, M. M. (2021). Consolidating core entrepreneurial competences: toward a meta-competence framework. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, 27(1). <https://doi.org/10.1108/IJEBR-02-2020-0079>
12. Sinambela, E. A., Mardikaningsih, R., Arifin, S., & Ayu, H. D. (2020). Development of Self Competence and Supervision to Achieve Professionalism. *Journal of Islamic Economics Perspectives*, 1(2). <https://doi.org/10.35719/jiep.v1i2.13>
13. Hernandez-de-Menendez, M., Morales-Menendez, R., & Escobar, C. A. (2020). Competencies for Industry 4.0. *Int J Interact Des Manuf*, 14, 1511–1524. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00716-2>
14. Abdrakhman, G., Issabekova, G., & Kudabayeva, P. (2022). Multiculturalism As A Pedagogical Category Of Integrative-Modular Approach. *Education Journal for Educators, Teachers and Trainers*, 13(1), 126–140. DOI: <https://doi.org/10.47750/jett.2022.13.01.015>
15. Gutu, V., & Boghian, I. (2019). A Bidimensional Psycho-pedagogical Model for Tolerance Education. *Romanian Journal for Multidimensional Education/Revista Romaneasca pentru Educatie Multidimensionala*, 11(4).
16. Sokol, M., Galyna, R., Khrystyna, S., Hvozdyak, O. (2021). Tolerance in the communicative culture of modern educational manager. *Propósitos y representaciones*, 9(2). Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8108857>
17. Tangirov, E. S. (2022). Mechanisms of educational study of students on the basis of modern pedagogical technologies. *Spectrum Journal of Innovation, Reforms and Development*, 4, 247–250. Retrieved from <https://sjird.journalspark.org/index.php/sjird/article/view/108>

УДК 376-056.2/:785;3(036)

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-15>

НАТАЛІЯ ДУБ

кандидат наук з державного управління, доцент, декан факультету, Комунальний заклад вищої освіти Львівської обласної ради «Львівська медична академія імені Андрея Крупинського», вул. Дорошенка, 70, м. Львів, Україна, 79000

ORCID: 0000-0001-6193-9407

Бібліографічний опис статті: Дуб, Н. (2025). Роль академічної мобільності як інструменту інклюзивної освіти студентів з інвалідністю в медичних освітніх закладах. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 109–114, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-15>

РОЛЬ АКАДЕМІЧНОЇ МОБІЛЬНОСТІ ЯК ІНСТРУМЕНТУ ІНКЛЮЗИВНОЇ ОСВІТИ СТУДЕНТІВ З ІНВАЛІДНІСТЮ В МЕДИЧНИХ ОСВІТНІХ ЗАКЛАДАХ

Органічним складником сучасних навчальних планів, які відбивають кореляцію академічного життя зі світом культур, суспільств, смислів в глобальному, мінливому просторі вищої освіти стає академічна мобільність студентів з інвалідністю. Актуальна повістка вищої медичної освіти насичена світовим трендом, спрямованим на посилення інтеграції для інновацій як властивості емерджентності відкритих систем, з урахуванням взаємодії в гетерогенній середовищі. Академічна мобільність нині є як контекстом, принципом, формою, механізмом освітньої політики держави, університету. Підсумовано, що питання забезпечення можливостей академічної мобільності для студентів з інвалідністю розглядається в межах особистісно-зорієнтованого підходу й апелює до розширення теоретико-практичного досвіду, необхідного для застосування у майбутній професійній та навчальній діяльності, а також для професійного та особистісного розвитку. Підкреслено, що важливим кроком до забезпечення академічної мобільності студентів з інвалідністю є використання в освітній практиці інформаційно-комунікаційних технологій, комп'ютерного навчання (онлайн курсів та програм). Академічна мобільність визначається середовищем, в якому знаходиться студент з особливими освітніми потребами та інвалідністю, системою соціальних відносин із суспільством, побудованих на основі суб'єкт-суб'єктної взаємодії, цілей діяльності суб'єктів, особистісних особливостей. Розвиток академічної мобільності у студентів з інвалідністю сприятиме їхній успішній підготовці до майбутнього працевлаштування та самореалізації у професії, підвищенню конкурентоспроможності. Специфічність забезпечення академічної мобільності студентів з інвалідністю в медичних освітніх закладах полягає в необхідності врахування того, що на її розвиток впливають об'єктивні та суб'єктивні фактори. Об'єктивним фактором, що ускладнює її організацію визначено просторово-середовищні умови, рівень доступності до всіх програм, які реалізовується ЗВО. До суб'єктивних факторів віднесено індивідуальну картину інвалідності студента. Узагальнено, що забезпечення академічної мобільності студентів з інвалідністю в медичних освітніх закладах базується на кадрових, інформаційних, навчально-методичних, організаційних, матеріально-технічних, просторових, психолого-педагогічних ресурсах мобільного освітнього середовища.

Ключові слова: академічна мобільність, вища освіта, студенти з інвалідністю, викладачі, мобільне освітнє середовище, інклюзивна освіта, особливі освітні потреби.

Nataliya DUB

Candidate of Science in Public Administration, Associate Professor, Dean of the Faculty, Communal Institution of Higher Education of Lviv Regional Council "Andrei Krupynskyi Lviv Medical Academy", 70 Doroshenko str., m. Lviv, Ukraine, 79000

ORCID: 0000-0001-6193-9407

To cite this article: Dub, N. (2025). Rol akademichnoi mobilnosti yak instrumentu inkluzyvnoi osvity studentiv z invalidnistiu v medychnykh osvitnikh zakladakh [The role of academic mobility as a tool for inclusive education of students with disabilities in medical educational institutions]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 109–114, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-15>

THE ROLE OF ACADEMIC MOBILITY AS A TOOL FOR INCLUSIVE EDUCATION OF STUDENTS WITH DISABILITIES IN MEDICAL EDUCATIONAL INSTITUTIONS

An organic component of modern curricula that reflect the correlation of academic life with the world of cultures, societies, and meanings in the global, changing space of higher education is the academic mobility of students with disabilities. The current agenda of higher medical education is saturated with a global trend aimed at strengthening integration for innovations as a property of the emergence of open systems, taking into account interaction in a heterogeneous environment. Academic mobility is now a context, principle, form, and mechanism of the educational policy of the state and university. It is summarized that the issue of ensuring academic mobility opportunities for students with disabilities is considered within the framework of a personality-oriented approach and appeals to the expansion of theoretical and practical experience necessary for application in future professional and educational activities, as well as for professional and personal development. It is emphasized that an important step towards ensuring academic mobility of students with disabilities is the use of information and communication technologies, computer learning (online courses and programs) in educational practice. Academic mobility is determined by the environment in which a student with special educational needs and disabilities is located, the system of social relations with society, built on the basis of subject-subject interaction, the goals of the subjects' activities, and personal characteristics. The development of academic mobility in students with disabilities will contribute to their successful preparation for future employment and self-realization in the profession, and increase competitiveness. The specificity of ensuring academic mobility of students with disabilities in medical educational institutions lies in the need to take into account the fact that its development is influenced by objective and subjective factors. The objective factor complicating its organization is determined to be spatial and environmental conditions, the level of accessibility to all programs implemented by the higher education institution. Subjective factors include the individual picture of the student's disability. It is generalized that ensuring academic mobility of students with disabilities in medical educational institutions is based on personnel, information, educational and methodological, organizational, material and technical, spatial, psychological and pedagogical resources of the mobile educational environment.

Key words: academic mobility, higher education, students with disabilities, teachers, mobile educational environment, inclusive education, special educational needs.

Актуальність проблеми. Провідною метою сучасної освітньої політики є забезпечення рівного доступу до якісної освіти для всіх здобувачів з урахуванням особливостей їх психофізичного розвитку. Необхідною умовою реалізації цього завдання є створення умов доступності для студентів з інвалідністю у сфері вищої освіти, в тому числі медичної, надання їм необхідної допомоги в подолання бар'єрів, що заважають одержанню освітніх послуг. У глобальному просторі вищої освіти, який стрімко змінюється, академічна мобільність (далі – АМ) стає важливим елементом культури підтримки різноманітності, органічним елементом навчального плану (curriculum), що пов'язує академічне життя з ширшим світом культур, суспільств, смислів. Академічна мобільність є важливим фактором формування ключових навичок ХХІ століття. Тому така ініціатива підтримується на національних та транснаціональних рівнях і нині є нормою, а не винятком.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Освітня спільнота активно досліджує засади забезпечення АМ (Zadorina, Hurskaya, Sobolyeva, Grekova & Vasylyuk-Zaitseva, 2024), звертаючись до досвіду країн ЄС та світу

загалом. Так, Я.Величко висвітлила організацію міжнародної мобільності студентів у ВНЗ (Величко, 2018). М.Гриньова, О.Ніколенко, К.Вотсон, М.Зуєнко та І.Когут виявили шляхи впровадження віртуальної АМ із застосуванням технологій COIL (Гриньова, Ніколенко, Вотсон, Зуєнко & Когут, 2024). В доробку Ю.Грищук проаналізовано міжнародну академічну мобільність в Україні з точки зору виявлення її проблем та перспектив (Грищук, 2014). Когорта сучасних дослідників (Завгородня, 2018; Заячук, 2021; Мартинюк & Губіна, 2024 та ін.) обґрунтували значення АМ для забезпечення якості професійної підготовки фахівців в контексті аналізу освітніх програм ЄС та можливостей українських університетів. Своєю чергою М.Романинець здійснив вивчення філософсько-правових аспектів АМ українського студентства в умовах глобалізованого простору (Романинець, 2019). З метою конкретизації АМ як умови інноваційного розвитку освітнього простору України проаналізовано (Черушева, Колесник & Довбня, 2023) європейську та світову практику академічної мобільності; виявлено потенціал АМ для інтернаціоналізації системи вищої освіти України на шляху до Європейського Союзу (Чимбай,

Попкова & Ханюк, 2022) та підвищення конкурентоспроможності закладів вищої освіти України (Ян & Яо, 2024). Однак в науковій літературі АМ як засіб інклюзивної освіти розглядається лише поверхнево, хоча вона має значний потенціал для забезпечення освітніх потреб студентів з інвалідністю.

Мета дослідження полягає у висвітленні ролі і місця академічної мобільності в забезпеченні інклюзивності освіти студентів з інвалідністю в медичних освітніх закладах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Простір вищої освіти в зарубіжних країнах та Україні нині достатньо демонструє відкритість, одним із проявів якої є програми АМ. Часто про рівень розвитку університету як освітньої одиниці та прояв у відповідних індикаторах міжнародних рейтингів свідчить участь ЗВО у цих програмах не лише професорсько-викладацького складу, але й студентства. Актуальна повістка вищої медичної освіти насичена світовим трендом, спрямованим на посилення інтеграції для інновацій як властивості емерджентності відкритих систем, з урахуванням взаємодії в гетерогенній середовищі. АМ як контекст, принцип, форма, механізм освітньої політики держави, університету на суб'єктному рівні, що забезпечується відповідними психологічними утвореннями, перебуває у сфері уваги світової науки. Загальний підхід до організації АМ поки не концептуалізовано, але результати існуючих досліджень підкреслюють, що АМ функціонує у зовнішньому аспекті як інструмент освітнього середовища, й у внутрішньому – як властивість особистості студента, що забезпечує готовність та успішність реалізації АМ. Наукову увагу нині привертає питання щодо АМ студентів з інвалідністю як умови інклюзивності освітнього простору закладів вищої медичної освіти. Незважаючи на те, що феномен студента з інвалідністю не є сьогодні ексклюзивним у вищій школі, і інклюзія входить до актуального освітнього порядку всіх університетів. Проблема АМ потребує кропітного опрацювання. З цією метою варто проаналізувати тенденції у світовій та вітчизняній науці, що стосуються створення умов для АМ студентів з інвалідністю.

Вивчення публікацій вчених, що розкривають сутність явища АМ підкреслюють існування двох засадничих підходів до його розуміння. В контексті

першого – діяльнісно-організаційного – підходу АМ прирівнюється до освітньої міграції – тобто переміщення студентів на певний академічний період (семестр або навчальний рік) до іншого закладу вищої освіти (всередині країни або за кордон) для навчання або проведення досліджень (Чимбай, Попкова & Ханюк, 2022). Тоді як прихильники другого – особистісно-зорієнтованого – підходу витлумачують АМ як готовність студентів до оволодіння новими знаннями і технологіями, гнучкість мислення і здатність до рефлексивної оцінки власної діяльності, готовність до змін, міжкультурного спілкування та співпраці досвіду, здатність до самоосвіти та потреба в самовдосконаленні (Гриньова, Ніколенко, Вотсон, Зуєнко & Когут, 2024).

Забезпечення можливостей АМ для студентів з інвалідністю розглядається в межах особистісно-зорієнтованого підходу й апелює до розширення теоретико-практичного досвіду, необхідного для застосування у майбутній професійній та навчальній діяльності, а також для професійного та особистісного розвитку. Дослідники підкреслюють, що АМ для студентів з особливими освітніми потребами (далі – ООП) є «необхідною умовою розвитку ключових та професійних компетентностей» (Ян & Яо, 2024).

Примітно, що в публікаціях зарубіжних авторів АМ розглядається у контексті реалізації міжнародних програм, зокрема програми Еразмус. Дослідники наголошують на актуальності мобільності в майбутній професійній діяльності студентів, оптимізації комунікативних здібностей та особистісного збагачення через розвиток незалежності та впевненості.

Вважаємо, що АМ набуває особливого значення у фаховому становленні для студентів з ООП та інвалідністю. Розвиток академічної мобільності у студентів з інвалідністю сприятиме їхній успішній підготовці до майбутнього працевлаштування та самореалізації у професії, підвищенню конкурентоспроможності. Специфічність забезпечення АМ студентів з інвалідністю в медичних освітніх закладах полягає в необхідності врахування того, що на її розвиток впливають об'єктивні та суб'єктивні фактори. Об'єктивним фактором, що ускладнює організацію АМ є просторово-середовищні умови, рівень доступності до всіх програм, які реалізовується ЗВО. Часто студенти з інвалідністю зіштовхуються з проблемами

участі в міжвузівських та міжнародних програм обміну (переміщення студентів на певний академічний період до іншого вищого навчального закладу для навчання або проведення досліджень), зумовлених відсутністю безбар'єрного простору. Це перешкоджає розвитку мобільності, формуванню професійних навичок тощо.

Вирішення цієї проблеми криється в створенні академічного середовища медичних освітніх закладів засобами сучасних цифрових технологій, щоб забезпечити рівні освітні можливості всім студентам, у тому числі й тим, хто має ООП. Концептуальним підґрунтям такого середовища є ідеї *sarability approach*, який опирається на індивідуальні здібності студентів з інвалідністю та заснований на справедливості та рівності можливостей. Освітнє середовище з погляду *sarability approach* реалізується за допомогою мобільного освітнього середовища, яке визначається як складна система взаємодії між об'єктами, суб'єктами та інформаційними ресурсами освітнього простору, створеного на основі застосуванням сучасних інформаційних технологій. За словами М.Гриньової, О.Ніколенко, К.Вотсон, М.Зуєнко та І.Когут, котрі вивчали віртуальну АМ із застосуванням технологій COIL, вона розширює можливі сценарії навчання для здобувачів з інвалідністю також. Адже, наприклад, студенти можуть перейти в інший університет, щоб отримати певні кредити на місці, продовжуючи навчатися (Гриньова, Ніколенко, Вотсон, Зуєнко & Когут, 2024). Зокрема, мобільне інклюзивне освітнє середовище базується на участі в міжнародних програмах. Вивчення засад АМ студентів з інвалідністю та ООП демонструє, що у XXI столітті створюється велика кількість міжнародних програм (Erasmus, IAESTE, DAAD, Tempus, Visby, North to North, Needs, At-Risk Students та ін.), фондів в межах роботи яких створено мережу інклюзивних європейських університетів з метою інтеграції та реалізації транснаціональної мобільності.

Мобільне інклюзивне освітнє середовище медичних освітніх закладів має вибудовуватись та розвиватися як необхідна складова інклюзивного освітнього простору, але для його ефективного використання необхідно підвищувати рівень АМ студентів з інвалідністю як інтегративної особистісної якості.

Важливим кроком до забезпечення АМ студентів з інвалідністю є використання в освітній

практиці інформаційно-комунікаційних технологій, комп'ютерного навчання (онлайн курсів та програм). Поза як, академічна мобільність визначається середовищем, в якому знаходиться студент з ООП та інвалідністю, системою соціальних відносин із суспільством, побудованих на основі суб'єкт-суб'єктної взаємодії, цілей діяльності суб'єктів, особистісних особливостей. Продовжуючи, відзначимо, що на процес АМ студентів з інвалідністю впливають також суб'єктивні фактори. Зокрема йдеться про сприйняття власної картини інвалідності. Дієвим механізмом нівелювання негативного впливу цього чинника на АМ студентів є організація супроводу тьютора. Очевидно, що нині ідея забезпечення АМ в межах вищої інклюзивної освіти недостатньо осмислена педагогічною спільнотою, існує значне відставання темпів популяризації АМ серед студентів з ООП в Україні та країнах ЄС, що перешкоджає розвитку академічної мобільності як особистісної властивості. Це, зокрема, зумовлено відсутністю науково-обґрунтованих, практично-орієнтованих моделей АМ в рамках інклюзії, що дозволяють акумулювати ресурси міжнародної освіти для включення студентів з ООП в реальне студентське та квазіпрофесійне середовище.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Перехід вищої медичної освіти на нову модель навчання, засновану на індивідуалізації, міжрегіональній та міжнародній інтеграції, орієнтовану на запити нової доби та інноваційний розвиток медицини спрямовує до пошуку шляхів забезпечення рівних умов навчання для нормотипових студентів та здобувачів з інвалідністю та ООП. Розвиток засад інклюзивної вищої освіти породжує необхідність вивчення умов та специфіки організації академічної мобільності студентів з інвалідністю, доступності відповідних програм. Здійснений аналіз наукової літератури та власний досвід організації інклюзивної освіти для студентів з інвалідністю в медичних освітніх закладах свідчить про те, що забезпечення АМ базується на кадрових, інформаційних, навчально-методичних, організаційних, матеріально-технічних, просторових, психолого-педагогічних ресурсах мобільного освітнього середовища. Перспективи подальших наукових розвідок полягають у висвітленні особливостей забезпечення цих ресурсів в медичних освітніх закладах.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Величко Я.І. Організація міжнародної мобільності студентів ВНЗ. URL: <https://api.dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/a24a3619-5e84-4f94-af44-2a35b59c0970/content> (дата звернення: 13.01.2025).
2. Гриньова М., Ніколенко О., Вотсон К., Зуєнко М., Когут І. Віртуальна академічна мобільність із застосуванням технологій COIL: розробка курсу та його оцінювання студентами ПНПУ імені В.Г.Короленка та Копенгагенського університету (Данія). *Витоки педагогічної майстерності*. 2024. Вип. 33. С. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.33989/2075-146x.2024.33.3099489>.
3. Грищук Ю.В. Міжнародна академічна мобільність в Україні: проблеми та перспективи. *Освітнологічний дискурс*. 2014. № 2 (6). С. 33–40. URL: <https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/3875> (дата звернення: 13.09.2024).
4. Завгородня А.А. Академічна мобільність як засіб забезпечення якості професійної підготовки фахівців економічної галузі України. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/715121/1/2382.pdf> (дата звернення: 10.01.2025).
5. Заячук Ю. Освітні програми ЄС та можливості для викладача українського університету. *Український педагогічний журнал*. 2021. № 2. С. 5–19. DOI: <https://doi.org/10.32405/2411-1317-2021-2-5-1910>.
6. Мартинюк А.П., Губіна А.М. Академічна мобільність студентів як вагома складова інтернаціоналізації освіти. *Академічні студії. Серія «Педагогіка»*. 2024. Вип. 2. С. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.52726/as.pedagogy/2024.2.612>.
7. Романинець М.Р. Академічна мобільність українського студентства в умовах глобалізованого простору: філософсько-правові аспекти. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Юридичні науки*. 2019. Вип. 21. С. 77–83.
8. Черушева Г.Б., Колесник С.Г., Довбня С.О. Європейська та світова практика академічної мобільності для інноваційного розвитку освітнього простору України. *Академічні візії*. 2023. Вип. 17. DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7791200>
9. Чимбай Л.Л., Попкова Л.В., Ханюк Т.О. Роль інтернаціоналізації системи вищої освіти України на шляху до Європейського Союзу. *Освітня аналітика України*. 2022. № 4 (20). С. 31–48.
10. Ян Ц., Яо С. Роль академічної мобільності студентів у підвищенні конкурентоспроможності закладів вищої освіти України. *Педагогічна Академія: наукові записки*. 2024. № 12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14171878>
11. Zadorina O., Hurskaya V., Sobolyeva S., Grekova L., Vasylyuk-Zaitseva S. The role of artificial intelligence in creation of future education: Possibilities and challenges. *Futurity Education*. 2024. Vol. 4(2). P. 163–185. DOI: <https://doi.org/10.57125/FED.2024.06.25.09>

REFERENCES:

1. Velychko, Ya.I. (2018). Orhanizatsiia mizhnarodnoi mobilnosti studentiv VNZ [Organisation of international mobility of university students]. Retrieved from <https://api.dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/a24a3619-5e84-4f94-af44-2a35b59c0970/content> (data zvernennia: 13.01.2025) [in Ukrainian].
2. Hrynova, M., Nikolenko, O., Votson, K., Zuienko, M., & Kohut, I. (2024). Virtualna akademichna mobilnist iz zastosuvanniam tekhnolohii COIL: rozrobka kursu ta yoho otsiniuvannia studentamy PNPU imeni V.H.Korolenka ta Kopenhahenskoho universytetu (Daniia) [Virtual academic mobility using COIL technologies: course development and evaluation by students of V. G. Korolenko National Pedagogical University and the University of Copenhagen (Denmark)]. *Vytoky pedahohichnoi maisternosti – The origins of pedagogical excellence*, 33, 59–65. DOI: <https://doi.org/10.33989/2075-146x.2024.33.3099489> [in Ukrainian].
3. Hryshchuk, Yu. V. (2014). Mizhnarodna akademichna mobilnist v Ukraini: problemy ta perspektyvy [International academic mobility in Ukraine: problems and prospects]. *Osvitlohichnyi dyskurs – Educational discourse*, 2(6), 33–40. URL: <https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/3875> (data zvernennia: 13.09.2024) [in Ukrainian].
4. Zavhorodnia, A.A. (2018). Akademichna mobilnist yak zasib zabezpechennia yakosti profesiinoi pidhotovky fakhivtsiv ekonomichnoi haluzi Ukrainy [Academic mobility as a way to ensure the quality of professional training of facists of the economical Galuzia of Ukraine]. Retrieved from <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/715121/1/2382.pdf> (data zvernennia: 10.01.2025) [in Ukrainian].
5. Zaiachuk, Yu. (2021). Osvitni prohramy YeS ta mozhlyvosti dlia vykladacha ukrainskoho universytetu [EU educational programmes and opportunities for a Ukrainian university teacher]. *Ukrainskyi pedahohichnyi zhurnal – Ukrainian Pedagogical Journal*, 2, 5–19. DOI: <https://doi.org/10.32405/2411-1317-2021-2-5-1910> [in Ukrainian].
6. Martyniuk, A.P., & Hubina, A.M. (2024). Akademichna mobilnist studentiv yak vahoma skladova internatsionalizatsii osvity [Academic mobility of students as a significant component of internationalisation of education]. *Akademichni studii. Seriiia “Pedahohika” – Academic studies. Series ‘Pedagogy’*, 2, 35–43. DOI: <https://doi.org/10.52726/as.pedagogy/2024.2.612> [in Ukrainian].
7. Romanynets, M.R. (2019). Akademichna mobilnist ukrainskoho studentstva v umovakh hlobalizovanoho prostoru: filosofska-pravovi aspekty [Academic mobility of Ukrainian students in a globalised space: philosophical and

legal aspects]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnikha". Seriya: Yurydychni nauky – Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Legal Sciences*, 21, 77–83. [in Ukrainian].

8. Cherusheva, H.B., Kolesnyk, S.H., Dovbnia, S.O. (2023). Yevropeiska ta svitova praktyka akademichnoi mobilnosti dlia innovatsiinoho rozvytku osvithnoho prostoru Ukrainy [European and world practice of academic mobility for innovative development of the educational space of Ukraine]. *Akademichni vizii – Academic visions*, 17. DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7791200> [in Ukrainian].

9. Chymbai, L.L., Popkova, L.V., Khaniuk, T.O. (2022). Rol internatsionalizatsii systemy vyshchoi osvity Ukrainy na shliakhu do Yevropeiskoho Soiuzu [The role of internationalisation of the higher education system of Ukraine on the way to the European Union]. *Osvitnia analityka Ukrainy – Educational analytics of Ukraine*, (20), 31–48. [in Ukrainian].

10. Yan, Ts., & Yao, S. (2024). Rol akademichnoi mobilnosti studentiv u pidvyshchenni konkurentospromozhnosti zakladiv vyshchoi osvity Ukrainy [The role of academic mobility of students in increasing the competitiveness of higher education institutions in Ukraine]. *Pedahohichna Akademiia: naukovi zapysky – Pedagogical Academy: scientific notes*, (12). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14171878> [in Ukrainian].

11. Zadorina, O., Hurskaya, V., Sobolyeva, S., Grekova, L., & Vasylyuk-Zaitseva, S. (2024). The role of artificial intelligence in creation of future education: Possibilities and challenges. *Futurity Education*, 4(2), 163–185. DOI: <https://doi.org/10.57125/FED.2024.06.25.09>

УДК 378.147:004.8

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-16>

Роман ЛУЦИШИН

аспірант кафедри машинознавства і транспорту, Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, вул. М. Кривоноса, 2, м. Тернопіль, Україна, 46027

ORCID: 0000-0002-3390-874X

Бібліографічний опис статті: Луцишин, Р. (2025). Моделювання підготовки майбутніх фахівців цифрових технологій у закладах вищої освіти до застосування адаптивних систем. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 115–120, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-16>

МОДЕЛЮВАННЯ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ ДО ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ

Мета роботи. Дослідження методологічних та організаційних аспектів підготовки фахівців у галузі цифрових технологій актуалізується на тлі загальної трансформації середовища вищої освіти. Метою статті є розробка моделі підготовки майбутніх фахівців у галузі інформаційних технологій у закладах вищої освіти до застосування адаптивних систем. Моделювання дозволяє розробити унаочнену схему практичного забезпечення ефективності освітньої діяльності у встановленому напрямку.

Методологія. У процесі дослідження використано методи: теоретичний – для вивчення науково-методичних матеріалів, узагальнення інформації; метод педагогічного моделювання – з метою дослідження педагогічних об'єктів за допомогою моделювання структурно-змістовних, процесуальних та концептуальних характеристик освітнього процесу.

Наукова новизна. Проаналізовано основні напрями вдосконалення системи підготовки майбутніх фахівців цифрових технологій, у тому числі – використання інтерактивних та імерсивних методів навчання. Виокремлено основні компетентності фахівців у галузі інформаційних технологій, що повинні бути сформовані в процесі вищої освіти. Закцентовано на концепції формування міжпредметних зв'язків у межах запропонованої моделі. У межах запропонованої моделі виокремлено цільовий, змістовний, процесуальний, навчально-технологічний та результативно-діагностичний компоненти.

Висновки. Встановлено взаємодоповнюваність та взаємозалежність окремих компонентів запропонованої моделі. Доведено, що моделювання є ефективним методом організаційного забезпечення процесу підготовки майбутніх фахівців цифрових технологій у закладах вищої освіти до застосування адаптивних систем.

Ключові слова: професійна компетентність, фахівці цифрових технологій, адаптивна система, моделювання, модель, інноваційні методи, вища освіта, професійна компетентність.

Roman LUTSYSHYN

Postgraduate Student at the Department of Mechanical Engineering and Transport, Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, 2 M. Kryvonosa str., Ternopil, Ukraine, 46027

ORCID: 0000-0002-3390-874X

To cite this article: Lutsyshyn, R. (2025). Modeliuvannia pidhotovky maibutnikh fakhivtsiv tsyfrovyykh tekhnolohii u zakladakh vyshchoi osvity do zastosuvannia adaptivnykh system [Modeling the training of future digital specialists in higher education institutions for the use of adaptive systems]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 115–120, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-16>

MODELING THE TRAINING OF FUTURE DIGITAL TECHNOLOGY SPECIALISTS IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS FOR THE USE OF ADAPTIVE SYSTEMS

Purpose of the work. The study of methodological and organizational aspects of training specialists in the field of digital technologies is being updated against the background of the general transformation of the higher education environment. The purpose of the article is to develop a model for training future specialists in the field of information

technologies in higher education institutions to use adaptive systems. Modeling allows you to develop a visual scheme for practical support of the effectiveness of educational activities in the established direction.

Methodology. The following methods were used in the research process: theoretical – for studying scientific and methodological materials, generalizing information; pedagogical modeling method – for the purpose of studying pedagogical objects by modeling the structural-content, procedural and conceptual characteristics of the educational process.

Scientific novelty. The main directions of improving the system of training future specialists in digital technologies are analyzed, including the use of interactive and immersive teaching methods. The main competencies of specialists in the field of information technologies that should be formed in the process of higher education are highlighted. The emphasis is on the concept of forming interdisciplinary connections within the proposed model. Within the proposed model, target, content, procedural, educational-technological and result-diagnostic components are distinguished.

Conclusions. The complementarity and interdependence of individual components of the proposed model are established. It is proven that modeling is an effective method of organizational support for the process of training future digital technology specialists in higher education institutions for the use of adaptive systems.

Key words: professional competence, digital technology specialists, adaptive system, modeling, model, innovative methods, higher education, professional competence.

Актуальність проблеми. Система підготовки майбутніх фахівців цифрових технологій у закладах вищої освіти передбачає очікувані результати у вигляді розвитку у випускника закладу високого рівня професійної компетентності. Дійсно, дефініція професійної підготовки є комплексним інтегративним поняттям, яке охоплює систему знань, умінь, навичок, а також здібностей, цінностей і особистісних якостей майбутнього фахівця, на основі яких формується його здатність ефективно здійснювати свою професійну діяльність.

Останнім часом значну увагу приділено питанню моделювання процесу підготовки фахівців концепції в контексті компетентнісного підходу до розвитку вищої освіти. У зв'язку з цим, очевидно вбачається необхідність формування універсальної моделі підготовки фахівців у сфері інформаційних технологій, що гарантує опанування студентами необхідних навичок та умінь, відповідно до динаміки сучасного ринку праці. При цьому, формування ключових компетентностей здобувачів вищої освіти має відбуватися в умовах, наближених до реалій професійної діяльності.

Коректне моделювання дозволяє розробити дієву схему практичного забезпечення ефективності певного фрагменту освітнього процесу. Результатом моделювання очікується розроблення структурно-функціональної моделі підготовки майбутніх фахівців у сфері цифрових технологій в контексті застосування адаптивних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деякі сучасні публікації аналізують складові системи професійної підготовки та цифровізацію освіти (Di Vaio, 2021; Моеіні, 2020), досліджують різні види професійної компетентності

(Caro та ін., 2015), розглядають процес в аспекті адаптованості до динаміки соціальних процесів (Casey & Bjørke, 2024), а також досліджують комунікаційну компетентність студентів вищої освіти (Tangirov, 2022; Ментинська, 2023). Концептуальні засади формування критичних компетентностей студентів в умовах, наближених до реалій професійної діяльності, потребують подальшого поглибленого дослідження завдяки сучасним технологіям цифровізації.

Деякі дослідники розглядають питання в аспекті особистісної зрілості випускника закладу вищої освіти та ролі міждисциплінарної інтеграції, яка відіграє значну роль в оптимізації системи професійної підготовки (Castro & Tumibay, 2021). Подальший розвиток ця тема отримала в роботах вчених Haleem та ін. (2022), Reis та ін. (2021), які приділяють значну увагу персоналізації педагогічного процесу, інтеграції принципів міжкультурної та комунікаційної компетентностей, а також використанню сучасних можливостей цифровізації.

Детальну аналітику досліджуваного феномену проводять вчені Sinambela та ін. (2020), Dzwigol та ін. (2020), які оцінюють компетентність студентів вищої освіти у розвитку Індустрії 4.0. До значних розробок належать роботи вчених Mitschek та ін. (2024), які виступають за трансформаційний підхід до парадигми вищої освіти, що базується на досягненні компетентності через впровадження в освітній процес імерсивних технологій віртуальної реальності.

Деякі автори (Gorski та ін., 2023) оцінюють пріоритетом освітньої підготовки концепцію особистісної зрілості студентів та залучення міждисциплінарного інтеграційного функціоналу, для створення умов навчання, наближених до реалій майбутньої професійної діяльності. Тематика

досліджуваної проблематики розширена в працях вчених Baird та ін. (2019) та Hernandez-de-Menendez & Morales-Menendez (2020), які займаються розробкою реалістичної педагогічної моделі розвитку професійної компетентності на основі інтеграції різноманітних форм взаємодії.

Не зважаючи на суттєві напрацювання учених, проблематика практичного моделювання процесу підготовки майбутніх фахівців цифрових технологій залишається маловивченою.

Мета дослідження. Метою статті є розробка моделі підготовки майбутніх фахівців у галузі інформаційних технологій у закладах вищої освіти до застосування адаптивних систем.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасні підходи до формування системи освіти передбачають активну взаємодію з інформаційним середовищем, яке позиціонується як місце накопичення актуальних знань. Професійну компетентність фахівців цифрових технологій в контексті адаптивних систем слід розглядати як цілісну, системну якість особистості.

Одним із провідних підходів до розуміння професійної компетентності є визначення її як системного явища, що об'єднує в собі знання, уміння та навички, а також професійно значущі якості особистості фахівця, що забезпечує виконання ним професійних обов'язків. Специфічними показниками професійної компетентності є ціннісні орієнтації, мотиви діяльності, інтегральні культурні маркери.

Із метою вдосконалення системи підготовки фахівців у галузі інформаційних технологій у межах даного дослідження було розроблено **модель підготовки**, що сформована із наступних компонентів:

- цільовий;
- змістовний;
- навчально-технологічний;
- процесуальний,
- результативно-діагностичний.

Цільовий компонент повинен бути комплексним пріоритетним потребам і завданням закладів вищої освіти щодо підготовки фахівців цифрових технологій та вимогам ринку праці. Цільовий компонент детермінує, першочергово, мету моделі – ефективну підготовку фахівців у визначеній галузі.

Змістовний компонент сформований зі змістовного підґрунтя системи підготовки фахівців, що детермінується стандартами вищої освіти,

освітньо-професійними програмами, Національною рамкою кваліфікацій, навчальними планами тощо. Необхідно зауважити, що система професійної підготовки майбутніх фахівців цифрових технологій містить в основі принципи системності, науковості, інноваційності, технологічності та практичної орієнтованості.

Навчально-технологічний компонент асимілює концепти програмно-технологічного та матеріально-технічного забезпечення процесу підготовки фахівців визначеної галузі. При цьому, сучасне програмно-технологічне забезпечення синергізує середовища моделювання, програмування та моніторингу, системи управління базами, автоматизовані інформаційно-пошукові системи та аналітичне програмне забезпечення. Водночас, матеріально-технічне забезпечення наразі активно залучає потенціал хмарної інфраструктури, у тому числі – бази даних, сервери з технологіями віртуалізації та кластеризації, навчально-тренінгові хаби.

Процесуальний компонент об'єднує різноманітні форми, методи та технології організації навчального процесу. Метою викладання основних навчальних дисциплін в галузі цифрових технологій вбачається опанування студентами теоретичних основ інформаційно-аналітичного забезпечення майбутньої професійної діяльності. Основними формами навчального процесу позиціонуються лекції, самостійна та індивідуальна робота, семінарські і практичні заняття, практика.

Компонентом даного аспекту моделі професійної підготовки є методи навчання: організація та реалізація навчально-пізнавальної діяльності; контроль, аналіз і оцінювання результатів навчання; стимулювання мотивації навчальної діяльності. Також, до інноваційних методів відносять практико-орієнтоване та проблемне навчання, інтерактивні ігри та лекції, презентації та тренінги, проєктний метод та технологія кейс-стаді.

Результативно-діагностичний компонент детермінує загальну програму оцінювання та визначення результатів системи підготовки фахівців цифрових технологій. Програма оцінювання, при цьому, повинна передбачати вимірювання рівнів сформованості компетентностей – загальних та спеціальних.

Очікуваним результатом запропонованої моделі визначено практичну готовність

майбутнього фахівця до фахової реалізації у сфері цифрових технологій. При цьому, всі компоненти моделі можуть бути вповні реалізованими лише за умови виконання низки педагогічних умов, до яких належать формування ціннісно-мотиваційної сфери, належна організація навчального процесу та адаптивний підхід до формування наповнення основних дисциплін навчальних планів.

На сьогодні активізується стратегія реформування національного освітнього середовища шляхом впровадження інформаційно-комп'ютерних технологій в освітні програми та використання сучасних мультимедійних технологій. Щодо систем вищої освіти, то глобальна концепція характеризується інтенсивним впровадженням нових технологій, які сприяють формуванню необмежених можливостей для створення інноваційних методів навчання. Ці методи поєднують елементи традиційної та дистанційної освіти та включають алгоритми технології віртуальної реальності.

Перспективними є спеціальні портали та хмарні технології, які забезпечують диференційовану аналітику та інформативні дані та пропонують віддалений доступ до масивів освітньої інформації та цільових програм. При цьому, навчальні заклади мають на вибір різноманітні типи платформ. Технології віртуальної та змішаної реальності допомагають імплементувати інтерактивний контент у навчальному середовищі. Діапазон технологій занурення включає різноманітні програми та інструменти, які дозволяють інтеграцію, занурення або взаємодію з симульованим середовищем та об'єктами.

Оскільки студенти та викладачі в інтегрованих освітній системі мають розширений доступ до різноманітних цифрових ресурсів та інструментів, традиційні практики навчання мають адаптивну динаміку. Завдяки активній взаємодії з цифровим контентом студенти створюють нові ресурси, спілкуються та розміщують результати своєї навчальної діяльності в особистому цифровому середовищі. У результаті цього процесу педагог може організувати навчальний процес на основі змішаної технології, поєднуючи онлайн-навчання та роботу студента, успішно підібрати ресурси для персоналізованого навчання та організувати практичні проекти взаємодії.

Інтеграція цифрових можливостей дозволяє переформатувати вимоги до майбутніх спеціалістів та трансформує зміст професійних обов'язків, що впливає на процес формування професійної компетентності. Важливо зазначити, що недостатній рівень відповідності вимогам ринку праці відображається у розвитку застарілих професійних орієнтацій і компетенцій, що призводить до кластеру звільнених працівників.

Розв'язання проблеми впровадження інформаційних систем для оптимізації навчального середовища базується на використанні концентричних інформаційних технологій, які об'єднують набір відповідних інформаційних баз даних, засобів і методів їх синтезу в єдиний цифровий інтегрований простір для задоволення інформаційних потреб закладів освіти максимально. Ця стратегія базується на інтеграції інструментів управління в інформаційній сфері для формування єдиної цифрової платформи навчального закладу, створенні універсальних засобів інформатизації та методів інформаційної взаємодії для відображення динаміки інформаційного середовища.

Незважаючи на численні позитивні аспекти застосування інноваційних технологій для формування професійного середовища, що характеризується певними викликами, недоліками та ризиками: висока вартісність та ускладнена доступність, необхідність сучасного технологічного та комунікативного забезпечення, потреба у перекваліфікації педагогічного складу.

Оскільки головним завданням в умовах глобальних інтегрованих освітніх процесів залишається збереження та підвищення якості освіти, необхідним є адекватне технічне забезпечення інтегрованого освітнього процесу, вибір оптимального програмного забезпечення інформаційних систем та порталних платформ, організація ефективного моніторингу та контролю. Дискурс про методологію вищої освіти в епоху цифровізації ринку праці в працях сучасних науковців представлений різними інтерпретаціями цієї дефініції, що свідчить про необхідність вироблення єдиного концептуального підходу. Запропонована у даному дослідженні модель поєднує найбільш важливі концепти практико-орієнтованої освіти за умов інтеграції адаптивних систем.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Структура запропонованої моделі підготовки майбутніх фахівців цифрових технологій у закладах вищої освіти до застосування адаптивних систем включає цільовий, змістовний, процесуальний, навчально-технологічний та результативно-діагностичний компоненти, які є взаємозалежними та взаємодоповнюючими. Специфікою запропонованої структурно-функціональної моделі є інтеграція практико-орієнтованої концепції професійної освіти в контексті адаптивних систем, залучення потенціалу інноваційного педагогічного та цифрового інструментарію, спрямованість на консолідацію різних форм навчально-методичного супроводу системи цільової підготовки фахівців цифрових технологій.

У дослідженні проаналізовано інноваційні методи навчання для розвитку фундаментальних навичок у студентів університету через

реальні професійні контексти. У сучасних інформаційних системах виділено засоби та сервіси, які урізноманітнюють процес навчання та підвищують ефективність навчального процесу. Наші результати переконливо свідчать про те, що запропонована модель навчання пов'язана не зі збільшенням кількості впроваджуваних педагогічних технологій, а зі зміною підходу до навчального процесу.

Це дослідження виявило прогалини в існуючих інноваційних методах планування розвитку основних навичок у студентів вищої освіти через реальні професійні контексти. Висвітлено новий напрямок досліджень у галузі освітніх технологій. Однак для практичного розуміння предмета необхідно подальше всебічне дослідження. Подальші перспективи досліджень вбачаються у розширеній аналітиці педагогічних умов формування професійної компетентності майбутніх фахівців цифрових технологій в умовах адаптивного навчання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Di Vaio A. The role of digital innovation in knowledge management systems: A systematic literature review. *Journal of business research*. 2021. № 123. P. 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.042>
2. Moeini M. Theory borrowing in IT-rich contexts: Lessons from IS strategy research. *Journal of Information Technology*. 2020. № 35(3). P. 270–282. <https://doi.org/10.1177/0268396220912745>
3. Caro M.F., Josyula D.P., Jiménez J.A. Multi-level pedagogical model for the personalization of pedagogical strategies in intelligent tutoring systems. *Dyna*. 2015. № 82(194). Pp. 185–193.
4. Casey A., Bjørke L. Teachers' experiences of enacting pedagogical models and models-based practice: a systematic mixed study review. *Physical Education and Sport Pedagogy*. 2024. Pp. 1–17.
5. Tangirov E.S. Mechanisms of educational study of students on the basis of modern pedagogical technologies. *Spectrum Journal of Innovation, Reforms and Development*. 2022. № 4. Pp. 247–250. URL: <https://sjird.journalspark.org/index.php/sjird/article/view/108>
6. Ментинська І. Етапи становлення комп'ютерної термінології на тлі розвитку інформаційних технологій в Україні. *Теорія і практика викладання української мови як іноземної*. 2023. № 17. С. 181–190. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/25274>
7. Castro M., Tumibay G. A literature review: efficacy of online learning courses for higher education institution using meta-analysis. *Education and Information Technologies*. 2021. № 26(2). Pp. 1367–1385. doi: <https://doi.org/10.1007/s10639-019-10027-z>
8. Haleem A., Javaid M., Qadri M., Suman R. Understanding the role of digital technologies in education: A review. *Sustainable Operations and Computers*. 2022. № 3. Pp. 275–285. doi: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.05.004>
9. Reis D., Fleury A., Carvalho M. Consolidating core entrepreneurial competencies: Toward a meta-competence framework. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*. 2021. № 27(1). doi: <https://doi.org/10.1108/IJEER-02-2020-0079>
10. Sinambela E., Mardikaningsih R., Arifin S., Ayu H. Development of self-competence and supervision to achieve professionalism. *Journal of Islamic Economics Perspectives*. 2020. № 1(2). doi: <https://doi.org/10.35719/jiep.v1i2.13>
11. Dzwigol H., Dzwigol-Barosz M., Miśkiewicz R., Kwilinski A. Manager competency assessment model in the conditions of industry 4.0. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 2020. № 7(4). doi: [https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(5\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(5))
12. Mitschek M., Sanares R., del Rosario M., Doctor Jr. Effectiveness and stakeholders of the student information system integration in higher education institutions. *Journal of Innovations in Business and Industry*. 2024. № 2(4). Pp. 199–206. doi: <https://doi.org/10.61552/JIBI.2024.04.002>

13. Gorski A., Ranf E., Badea D., Halmaghi E., Gorski H. Education for Sustainability – Some Bibliometric Insights. *Sustainability*. 2023. № 15(20). doi: 10.3390/su152014916
14. Baird A., Parayitam S. Employers' ratings of the importance of skills and competencies college graduates need to get hired: Evidence from the New England region of USA. *Education + Training*. 2019. № 61(5). Pp. 622–634. doi: <https://doi.org/10.1108/ET-12-2018-0250>
15. Hernandez-de-Menendez M., Morales-Menendez R. Escobar Competencies for Industry 4.0. *Int J Interact Des Manuf*. 2020. № 14. Pp. 1511–1524. doi: <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00716-2>

REFERENCES:

1. Di Vaio, A. (2021). The role of digital innovation in knowledge management systems: A systematic literature review. *Journal of business research*, 123, 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.042>
2. Moeini, M. (2020). Theory borrowing in IT-rich contexts: Lessons from IS strategy research. *Journal of Information Technology*, 35(3), 270–282. <https://doi.org/10.1177/0268396220912745>
3. Caro, M.F., Josyula, D.P., & Jiménez, J.A. (2015). Multi-level pedagogical model for the personalization of pedagogical strategies in intelligent tutoring systems. *Dyna*, 82(194), 185–193.
4. Casey, A., & Bjørke, L. (2024). Teachers' experiences of enacting pedagogical models and models-based practice: a systematic mixed study review. *Physical Education and Sport Pedagogy*, 1–17.
5. Tangirov, E.S. (2022). Mechanisms of educational study of students on the basis of modern pedagogical technologies. *Spectrum Journal of Innovation, Reforms and Development*, 4, 247–250. Retrieved from <https://sjird.journalspark.org/index.php/sjird/article/view/108>
6. Mentynska, I. (2023). Etapy stanovlennia kompiuternoi terminolohii na tli rozvytku informatsiinykh tekhnolohii v Ukraini [Stages of formation of computer terminology against the background of information technology development in Ukraine]. *Teoriia i praktyka vykladannia ukrainskoi movy yak inozemnoi*, 17, 181–190. Retrieved from <https://openarchive.nure.ua/handle/document/25274> [in Ukrainian]
7. Castro, M., & Tumibay, G. (2021). A literature review: efficacy of online learning courses for higher education institution using meta-analysis. *Education and Information Technologies*, 26(2), 1367–1385. doi: <https://doi.org/10.1007/s10639-019-10027-z>
8. Haleem, A., Javaid, M., Qadri, M., & Suman, R. (2022). Understanding the role of digital technologies in education: A review. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 275–285. doi: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.05.004>
9. Reis, D., Fleury, A., & Carvalho, M. (2021). Consolidating core entrepreneurial competencies: Toward a meta-competence framework. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, 27(1). doi: <https://doi.org/10.1108/IJEBR-02-2020-0079>
10. Sinambela, E., Mardikaningsih, R., Arifin, S., & Ayu, H. D. (2020). Development of self-competence and supervision to achieve professionalism. *Journal of Islamic Economics Perspectives*, 1(2). doi: <https://doi.org/10.35719/jiep.v1i2.13>
11. Dzwigol, H., Dzwigol-Barosz, M., Miśkiewicz, R., & Kwilinski, A. (2020). Manager competency assessment model in the conditions of industry 4.0. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4). doi: [https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(5\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(5))
12. Mitschek, M. R., Sanares, R. N., del Rosario, M. G., & Doctor, Jr. J. (2024). Effectiveness and stakeholders of the student information system integration in higher education institutions. *Journal of Innovations in Business and Industry*, 2(4), 199–206. doi: <https://doi.org/10.61552/JIBI.2024.04.002>
13. Gorski, A. T., Ranf, E. D., Badea, D., Halmaghi, E., & Gorski, H. (2023). Education for Sustainability – Some Bibliometric Insights. *Sustainability*, 15(20). doi: <https://doi.org/10.3390/su152014916>
14. Baird, A. M., & Parayitam, S. (2019). Employers' ratings of the importance of skills and competencies college graduates need to get hired: Evidence from the New England region of USA. *Education + Training*, 61(5), 622–634. doi: <https://doi.org/10.1108/ET-12-2018-0250>
15. Hernandez-de-Menendez, M., & Morales-Menendez, R. (2020). Escobar Competencies for Industry 4.0. *Int J. Interact Des Manuf*, 14, 1511–1524. doi: <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00716-2>

УДК 37.091.321-021.321:57](045)

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-17>

Світлана ЛЮЛЕНКО

кандидат педагогічних наук, доцент кафедри біології та здоров'я людини, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300
ORCID: 0000-0002-5898-4511

Бібліографічний опис статті: Люленко, С. (2025). Види масової позакласної роботи з біології, особливості підготовки та організації масових заходів. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 121–125, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-17>

ВИДИ МАСОВОЇ ПОЗАКЛАСНОЇ РОБОТИ З БІОЛОГІЇ, ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ МАСОВИХ ЗАХОДІВ

У статті розглядаються основні види масової позакласної роботи з біології та особливості її проведення в закладах загальної середньої освіти. Автори аналізують теоретичні засади організації таких заходів, їхню роль у формуванні пізнавального інтересу, екологічної свідомості та дослідницьких навичок учнів. Визначено, що масові позакласні заходи є потужним інструментом виховання екологічного мислення, відповідального ставлення до навколишнього середовища та раціонального використання природних ресурсів.

Досліджено особливості підготовки та організації масових заходів, визначено ключові педагогічні принципи, що забезпечують ефективність їх проведення: системність, плановість, практична спрямованість, використання інноваційних методів та міжпредметна інтеграція. Наголошено на необхідності залучення учнів до активної діяльності через проектну роботу, екологічні акції, конкурси, вікторини, експедиції та екскурсії.

Проаналізовано проблеми, які виникають під час організації масової позакласної роботи, зокрема відсутність належного матеріально-технічного забезпечення, низька мотивація учасників, обмежений час у вчителів та недостатня підготовка педагогів до реалізації таких ініціатив. Подано практичні поради щодо подолання цих викликів, серед яких: застосування міжпредметного підходу, співпраця з науковими установами та громадськими організаціями, залучення експертів.

Стаття містить аналіз сучасних науково-методичних підходів до проведення позакласних заходів з біології та окреслює перспективи розвитку цього напрямку в умовах реформування сучасної освіти. Підкреслено важливість інтеграції теоретичних знань з біології у практичну діяльність учнів, що сприяє закріпленню знань, розвитку дослідницьких компетентностей та екологічної свідомості школярів.

Ключові слова: позакласна робота, біологія, масові заходи, пізнавальний інтерес, екологічне виховання, дослідницькі компетентності.

Svitlana LIULENKO

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of Biology and Human Health, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300
ORCID: 0000-0002-5898-4511

To cite this article: Liulenko, S. (2025). Vydy masovoi pozaklasnoi roboty z biolohii, osoblyvosti pidhotovky ta orhanizatsii masovykh zakhodiv [Types of mass extracurricular activities in biology, features of preparation and organization of mass events]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 121–125, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-17>

TYPES OF MASS EXTRACURRICULAR ACTIVITIES IN BIOLOGY, FEATURES OF PREPARATION AND ORGANIZATION OF MASS EVENTS

The article examines the main types of mass extracurricular activities in biology and the specifics of their implementation in general secondary education institutions. The authors analyze the theoretical foundations of organizing such events, their role in developing students' cognitive interest, environmental awareness, and research skills. It is determined that mass extracurricular activities are a powerful tool for fostering ecological thinking, responsible attitudes toward the environment, and rational use of natural resources.

The study explores the features of preparing and organizing mass events, identifying key pedagogical principles that ensure their effectiveness: systematic planning, practical orientation, the use of innovative methods, and interdisciplinary integration. The importance of engaging students in active activities through project work, environmental campaigns, competitions, quizzes, expeditions, and excursions is emphasized.

Problems that arise during the organization of mass extracurricular work are analyzed, including the lack of adequate material and technical resources, low motivation of participants, limited time for teachers, and insufficient preparation of educators for implementing such initiatives. Practical recommendations are provided to overcome these challenges, including the use of interdisciplinary approaches, cooperation with scientific institutions and public organizations, and involving experts.

The article includes an analysis of modern scientific and methodological approaches to conducting extracurricular events in biology and outlines the prospects for developing this area in the context of modern educational reform. The importance of integrating theoretical knowledge of biology into students' practical activities is emphasized, contributing to knowledge consolidation, the development of research competencies, and students' environmental awareness.

Key words: extracurricular activities, biology, mass events, cognitive interest, environmental education, research competencies.

Актуальність проблеми. У сучасних умовах розвитку освіти масова позакласна робота з біології набуває особливого значення, оскільки вона сприяє підвищенню інтересу учнів до вивчення природничих наук, розвитку їхньої самостійності та формуванню екологічної свідомості. Водночас аналіз педагогічної практики показує, що далеко не всі навчальні заклади ефективно використовують можливості масових заходів для активізації навчального процесу. Часто такі заходи проводяться епізодично, без належної методичної підготовки, що знижує їхню ефективність.

Основними проблемами, які виникають при організації масової позакласної роботи є: відсутність системного підходу до планування масових заходів, недостатнє матеріально-технічне забезпечення для проведення екологічних акцій та польових практик, низька мотивація учнів до участі в позакласних заходах, обмеженість часу вчителів для якісної організації масової позакласної роботи, відсутність інтеграції позакласних заходів із загальною освітньою програмою.

Необхідність удосконалення методичних підходів до проведення масових позакласних заходів з біології є актуальною проблемою, яка потребує детального дослідження та розробки ефективних рекомендацій для педагогів

Масова позакласна робота з біології є важливим елементом сучасного освітнього процесу, що сприяє не лише засвоєнню знань, а й формуванню ціннісного ставлення до природи. У зв'язку зі змінами у сфері освіти, необхідністю впровадження компетентнісного підходу та розвитку екологічної свідомості учнів, актуальність вивчення ефективності масових заходів постійно зростає.

Сучасні учні мають широкий доступ до інформаційних ресурсів, однак для ефективного засвоєння знань необхідно створювати умови для їх активної участі у навчальному процесі. Масові форми позакласної роботи дозволяють зацікавити школярів, розширити їхні знання та залучити до практичної діяльності. Також такі заходи сприяють розвитку комунікативних навичок, умінь працювати в команді, критично мислити та аналізувати природні явища.

Незважаючи на значні переваги масових позакласних заходів, у сучасній освітній практиці спостерігаються проблеми їх ефективного впровадження. Недостатня методична підготовка вчителів, обмежені матеріально-технічні ресурси, відсутність чітких рекомендацій щодо організації позакласної роботи – все це перешкоджає її якісному проведенню. Тому дослідження видів масової позакласної роботи та особливостей її реалізації має важливе значення для вдосконалення освітнього процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження у сфері позакласної роботи з біології охоплюють широкий спектр питань, зокрема розвиток пізнавального інтересу, формування екологічної свідомості та удосконалення методів організації масових заходів.

У працях таких дослідників, як Савченко О.Я., Подмазін С.М., Ващенко Л.О. та Демченко Л.М., розглядаються сучасні підходи до викладання біології та ефективні методики проведення позакласних заходів, які сприяють активізації навчального процесу. Вони наголошують на важливості інтеграції позакласних заходів у загальну освітню програму та необхідності використання інноваційних технологій.

У працях таких дослідників, як Богданова О.К. та Кизенко В.І., розглядаються

сучасні підходи до викладання біології та ефективні методики проведення позакласних заходів, які сприяють активізації навчального процесу. Вони наголошують на важливості інтеграції позакласних заходів у загальну освітню програму та необхідності використання інноваційних технологій (Богданова, 2003).

Аналіз літератури свідчить, що ефективність масових позакласних заходів значно підвищується за умови врахування вікових особливостей учнів, використання інтерактивних методик та практичної спрямованості заходів. Разом з тим, залишається потреба у розробці більш детальних методичних рекомендацій для педагогів, що дозволить зробити позакласну діяльність ще більш результативною та привабливою для учнів.

Мета дослідження. Аналіз та узагальнення сучасних підходів до організації масової позакласної роботи з біології, визначення її основних видів і особливостей проведення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасна освіта спрямована не лише на засвоєння теоретичних знань, а й на формування всебічно розвиненої особистості. Позакласна робота з біології відіграє важливу роль у цьому процесі, оскільки сприяє розширенню світогляду учнів, розвитку їхньої творчості, пізнавального інтересу та екологічної свідомості.

Одним із найефективніших засобів залучення учнів до активної діяльності є масові форми позакласної роботи. Вони охоплюють велику кількість учнів, стимулюють їх до навчання, створюють сприятливі умови для розвитку соціальних навичок і самовираження.

Види масової позакласної роботи з біології.

Масові форми позакласної роботи поділяються на кілька основних видів:

- біологічні тижні та декади – комплекс заходів, спрямованих на популяризацію біологічних знань (виставки, вікторини, конкурси, екскурсії);
- предметні олімпіади – стимулюють учнів до самостійного вивчення біології, розвивають їхню дослідницьку компетентність;
- конкурси та вікторини – допомагають урізноманітнити навчальний процес, формують навички командної роботи;
- науково-популярні конференції – залучають учнів до обговорення актуальних екологічних та біологічних проблем;

- екологічні акції та кампанії – привчають до відповідального ставлення до природи (посадка дерев, прибирання територій, догляд за зеленими насадженнями);

- виставки робіт учнів – демонстрація результатів творчої діяльності (гербарії, моделі екосистем, дослідницькі проєкти);

- екскурсії та польові практики – дають змогу учням спостерігати біологічні явища в природних умовах, що сприяє розвитку їхніх дослідницьких здібностей (Дичківська, 2004).

Масові заходи з біології мають свою специфіку, що зумовлена необхідністю активного залучення великої кількості учнів, інтеграцією теоретичних знань у практичну діяльність та спрямованістю на формування екологічного світогляду. Ефективне проведення таких заходів потребує комплексного підходу та дотримання певних педагогічних принципів.

До принципів організації масових заходів відносять :

1. Системність і плановість – заходи мають бути складовою загального освітнього процесу, інтегруватися з навчальним матеріалом та організовуватися відповідно до календарного планування школи.

2. Доступність і диференціація – важливо враховувати вікові та індивідуальні особливості учнів, пропонуючи різні рівні складності завдань.

3. Практична спрямованість – акцент має бути зроблений на проведення експериментів, спостережень, проєктної діяльності, що дозволяє учням отримати практичний досвід.

4. Використання інноваційних методів – застосування інтерактивних технологій, цифрових ресурсів, мультимедійних презентацій, віртуальних лабораторій, які підвищують зацікавленість учнів.

5. Залучення учнів до активної діяльності – формування групових і командних завдань, квестів, ролевих ігор, що сприяють співпраці та розвитку комунікативних навичок (Кизенко, 2002).

6. Міжпредметна інтеграція – поєднання біології з іншими науками (екологія, хімія, фізика, географія), що дозволяє створювати міждисциплінарні заходи.

Виділяють три етапи організаційних аспектів проведення масових заходів.

1. Підготовчий етап:

- розробка плану заходу, визначення його тематики, формату і цільової аудиторії;
- підготовка інформаційних матеріалів, наочних посібників, демонстраційного обладнання;
- залучення фахівців (науковців, екологів, представників громадських організацій) для проведення лекцій або майстер-класів.

2. Основний етап:

- використання активних методів навчання, таких як дебати, дискусії, вікторини, біологічні експерименти;
- проведення практичних занять на місцевості (екскурсії, польові дослідження, екоакції);
- організація конкурсів, змагань, науково-популярних конференцій з підбиттям підсумків і нагородженням учасників.

3. Підсумковий етап:

- оцінка ефективності заходу через опитування, анкетування, аналіз зворотного зв'язку від учнів та вчителів;
- визначення перспектив удосконалення та планування подальших заходів з урахуванням отриманого досвіду.

Наведемо приклади успішних масових заходів з біології.

Тиждень біології – включає тематичні конкурси, інтерактивні заняття, виставки дослідницьких робіт учнів.

Екологічні акції («Посади дерево», «Збережемо птахів узимку») – сприяють вихованню відповідального ставлення до природи.

Наукові квести та біологічні марафони – залучають учнів до пізнавальної гри, що розвиває логічне мислення і знання.

Лекції та майстер-класи з біотехнологій – знайомлять учнів із сучасними досягненнями науки (Ярошенко, 1997).

Таким чином, успішне проведення масових позакласних заходів з біології вимагає ретельної організації, інноваційних методик та активного залучення учнів до процесу навчання через практичну діяльність.

Також важливо врахувати сучасні освітні тенденції, що включають використання цифрових технологій та інтеграцію практичної діяльності у навчальний процес.

Однією з ключових тенденцій є активне впровадження цифрових технологій у навчальний процес. Інтерактивні платформи, такі як

Google Classroom та Moodle, стали невід'ємною частиною організації дистанційного навчання. Вони дозволяють викладачам ефективно комунікувати з учнями, організовувати навчальні матеріали, оцінювати роботи та відстежувати прогрес учнів (Гура, 2018).

Крім того, використання віртуальних лабораторій відкриває нові можливості для проведення біологічних експериментів у цифровому середовищі. Це особливо актуально для тих шкіл та університетів, які не мають доступу до сучасного лабораторного обладнання. Завдяки віртуальним симуляціям учні можуть вивчати складні біологічні процеси та експериментувати без обмежень реального світу.

Доповнена та віртуальна реальність дозволяє візуалізувати складні біологічні явища, зокрема за допомогою 3D-моделей клітин, органів та екосистем. Такий підхід значно полегшує сприйняття складного матеріалу та сприяє глибшому розумінню навчального контенту (Сліпчук, 2006).

Мобільні додатки для моніторингу екологічного стану навколишнього середовища та ведення наукових спостережень стали незамінним інструментом для проведення польових досліджень. Учні можуть використовувати смартфони та планшети для збору даних, аналізу результатів та їх візуалізації, що сприяє формуванню навичок роботи з інформаційними технологіями.

Висновки і перспективи подальших досліджень. В статті досліджено особливості організації та проведення масової позакласної роботи з біології в закладах загальної середньої освіти. Визначено основні види таких заходів, їхню роль у формуванні пізнавального інтересу, екологічної свідомості та дослідницьких навичок учнів. Проведений аналіз сучасних науково-методичних підходів дозволив окреслити основні принципи та методи ефективної реалізації масових заходів. Масова позакласна робота є невід'ємною частиною освітнього процесу, оскільки сприяє активному залученню учнів до навчання, підвищує їхню мотивацію та формує стійкий інтерес до природничих наук. Різноманітність форм позакласної роботи від біологічних тижнів і предметних олімпіад до екологічних акцій і дослідницьких проєктів – дозволяє враховувати інтереси учнів і створювати умови для їхнього всебічного розвитку. Ефективність

заходів залежить від інтеграції практичної діяльності у навчальний процес, що сприяє закріпленню теоретичних знань через дослідження, експерименти та екологічні ініціативи. Важливість використання сучасних освітніх технологій – цифрових платформ, віртуальних лабораторій, мобільних додатків – для залучення учнів та вдосконалення навчального процесу. Отже, масова позакласна робота з біології має значний потенціал у формуванні компетентностей учнів, розвитку їхньої самостійності та

критичного мислення. Для підвищення її ефективності необхідно забезпечити системний підхід, використання сучасних технологій та інтеграцію практичної діяльності в навчальний процес. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення конкретних.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки та впровадження нових навчальних програм, курсів і методичних рекомендацій, спрямованих на розвиток навичок організації позакласної роботи з біології.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Богданова О. К. Сучасні форми і методи викладання біології в школі. Харків : Основа, 2003. 80 с.
2. Гура А. Н. Інформаційно-комунікаційні технології в підготовці майбутніх учителів природничих спеціальностей. Молодий вчений, 7 (59), 2018. 64–66.
3. Дичківська І. М. Інноваційні педагогічні технології. Навчальний посібник. Київ : Академвидав, 2004. 352 с.
4. Кизенко В. І. Особливості застосування методів навчання на факультативних заняттях. *Біологія і хімія в школі*. 2002. № 5. С. 6–13.
5. Сліпчук І. Ю. Дидактичні можливості інформаційних технологій у навчанні біології. *Біологія і хімія в школі*. 2006. № 5 С. 32–34.
6. Ярошенко О. Г. Групова навчальна діяльність школярів: Теорія і методика. Київ : Партнер, 1997. 193 с.

REFERENCES:

1. Bohdanova, O. K. (2003). Suchasni formy i metody vykladannia biolohii v shkoli [Modern forms and methods of teaching biology in school]. Kharkiv : Osnova.
2. Hura, A. N. (2018). Informatsiino-komunikatsiini tekhnolohii v pidhotovtsi maibutnikh uchyteliv pryrodnychkykh spetsialnostei [Information and communication technologies in the training of future teachers of natural sciences]. *Molodyi vchenyi*, 7(59), 64–66.
3. Dychkivska, I. M. (2004). Innovatsiini pedahohichni tekhnolohii [Innovative pedagogical technologies]. Kyiv : Akademvydav
4. Kyzenko, V. I. (2002). Osoblyvosti zastosuvannia metodiv navchannia na fakultatyvnykh zaniattiakh [Features of applying teaching methods in elective classes]. *Biolohiia i khimiia v shkoli*, (5), 6–13.
5. Slipchuk, I. (2006). Dydaktychni mozhlyvosti informatsiinykh tekhnolohii u navchanni biolohii [Didactic potential of information technologies in teaching biology]. *Biolohiia i khimiia v shkoli*, (5), 32–34.
6. Yaroshenko, O. H. (1997). Hrupova navchalna diialnist shkoliariv: Teoriia i metodyka [Group learning activities of schoolchildren: Theory and methodology]. Kyiv : Partner.

ЗМІСТ

ХІМІЯ

Назарій БЛАШКО, Олег МАРЧУК

НЕЦЕНТРОСИМЕТРИЧНІ СЕЛЕНІДИ $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ ($R - La, Ce, Pr$ ТА Nd).....3

Василь ЖИЛКО, Наталія СЛИВКА, Леся САЛІЄВА, Ольга ШКУРЕНКО,

Елла КАДИКАЛО, Тетяна БОРТНІК, Михайло ВОВК

РІСТІНГІБУЮЧА АКТИВНІСТЬ 2-(2-ОКСОІНДОЛІН-3-ІЛІДЕН)ЗАМІЩЕНИХ
5,6-ДИГІДРОІМІДАЗО[2,1-*b*]ТІАЗОЛОНІВ ТА 6,7-ДИГІДРОТІАЗОЛО[3,2-*a*]ПІРИМІДИНОНІВ.....10

Жолт КОРМОШ, Наталія ГОРБАТЮК, Юлія БОХАН, Наталія КОРМОШ,

Наталія НЕДАЙБОРЩ, Людмила ЛЮЛЬЧЕНКО, Людмила ПІСКАЧ

ІОННИЙ АСОЦІАТ БЕНДАЗОЛУ З МЕТИЛОВИМ ОРАНЖЕВИМ ТА ЙОГО АНАЛІТИЧНЕ
ВИКОРИСТАННЯ.....19

Сергій НЕДІЛЬКО, Олексій ІВАНОВ

ПРОГРАМОВАНИЙ СИНТЕЗ МАНГАНІТІВ СТРУКТУРИ ШПІНЕЛІ

НА ПРИКЛАДІ $Zn_{0.95}CO_{0.05}Mn_2O_4$25

Галина РІЗАК

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО СИНТЕЗУ ТА ВИВЧЕННЯ БІОЛОГІЧНОЇ ДІЇ

НОВИХ ГЕТЕРОЦИКЛІЧНИХ СПОЛУК НА ОСНОВІ АМІНОТІОФЕНІВ.....31

Андрій СЕЛЕЗЕНЬ, Любомир ГУЛАЙ, Микола МОРОЗ, Людмила ПІСКАЧ

ВЗАЄМОДІЯ В СИСТЕМАХ $Tl_2Se-Zn(Cd, Hg)Se-GeSe_2$41

Андрій СТЕЦЬКІВ, Володимир ПАВЛЮК

ФАЗОВІ РІВНОВАГИ У ПОЧЕТВІРНІЙ СИСТЕМІ $La-Li-Ni-Ge$ ЗА ТЕМПЕРАТУРИ 400 °C.....50

ЕКОЛОГІЯ

Костянтин ГРИГОР'ЄВ

ВИКИДИ ХІМІЧНИХ ПОЛЮТАНТІВ АВТОТРАНСПОРТОМ У МІСТІ МИКОЛАЄВІ

ПІД ЧАС ВІЙНИ.....58

Володимир КУЧЕРЕНКО, Юлія ТАМАРКІНА, Анастасія РЕДЬКО, Іріна ФРОЛОВА

АДСОРБЕНТИ, ОТРИМАНІ АЗОТНОКИСЛОТНИМ ІНТЕРКАЛЮВАННЯМ ТА ЛУЖНОЮ

АКТИВАЦІЄЮ АНТРАЦИТУ.....64

Зоряна ЛАВРИНЮК, Ольга КАРАЇМ, Віра ДУБЕНСЬКА

ОЦІНКА ШУМОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД АВТОТРАНСПОРТУ НА ВУЛИЦІ ВИННИЧЕНКА

МІСТА ЛУЦЬК.....77

Людмила САВЧУК, Роман ШУЛИПА

МОНІТОРИНГ ЗАГИБЕЛІ ДЕРЕВОСТАНІВ У ЗВІРІВСЬКОМУ ЛІСНИЦТВІ.....83

ОСВІТНІ, ПЕДАГОГІЧНІ НАУКИ. ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА

Василь БАРЛАДИН

ДО ПРОБЛЕМИ ВИОКРЕМЛЕННЯ ПЕДАГОГІЧНИХ УМОВ ПІДГОТОВКИ

МАЙБУТНІХ ПЕДАГОГІВ ПРОФЕСІЙНОГО НАВЧАННЯ У ЗАКЛАДАХ

ВИЩОЇ ОСВІТИ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ.....88

Ольга ГУЛАЙ, Олександр СУШИК, Ольга РЕДЬКО

ФУНКЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-КОНСУЛЬТАТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА

ЗАКЛАДУ ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ.....94

Михайло ДЕМЯНЧУК, Олена ГАШИНСЬКА, Олена ГОРСЬКА

МОЖЛИВОСТІ ОСОБИСТІСНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ В ФОРМУВАННІ

КОМУНІКАТИВНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ СТУДЕНТІВ МЕДИЧНИХ КОЛЕДЖІВ.....102

Наталія ДУБ

РОЛЬ АКАДЕМІЧНОЇ МОБІЛЬНОСТІ ЯК ІНСТРУМЕНТУ ІНКЛЮЗИВНОЇ ОСВІТИ СТУДЕНТІВ

З ІНВАЛІДНІСТЮ В МЕДИЧНИХ ОСВІТНІХ ЗАКЛАДАХ.....109

Роман ЛУЦИШИН

МОДЕЛЮВАННЯ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ ДО ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ.....115

Світлана ЛЮЛЕНКО

ВИДИ МАСОВОЇ ПОЗАКЛАСНОЇ РОБОТИ З БІОЛОГІЇ, ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ

ТА ОРГАНІЗАЦІЇ МАСОВИХ ЗАХОДІВ.....121

CONTENTS

CHEMISTRY

Nazarii BLASHKO, Oleg MARCHUK

NON-CENTROSYMMETRIC SELENIDES $R_3Ag_{0.45}Ga_{1.52}Se_7$ ($R = La, Ce, Pr$ AND Nd).....3

Vasyl ZHYLKO, Nataliia SLYVKA, Lesya SALIYEVA, Olga SHKURENKO, Ella KADYKALO, Tatiana BORTNIK, Mykhailo VOVK

GROWTH INHIBITING ACTIVITY OF 2-(2-OXOINDOLINE-3-YLIDENE)SUBSTITUTED 5,6-DIHYDROIMIDAZO[2,1-*b*]-THIAZOLONES AND 6,7-DIHYDROTHIAZOLO[3,2-*a*]PYRIMIDINONES.....10

Zholt KORMOSH, Natalia HORBATYUK, Yuliya BOKHAN, Natalia KORMOSH, Natalia NEDAIBORSHCH, Lyudmila LYULCHENKO, Lyudmyla PISKACH

IONIC ASSOCIATE OF BENDAZOL WITH METHYL ORANGE AND ITS ANALYTICAL APPLICATION.....19

Serhii NEDILKO, Oleksii IVANOV

PROGRAMMED SYNTHESIS OF SPINEL-STRUCTURED MANGANITES EXEMPLIFIED BY $Zn_{0.95}Co_{0.05}Mn_2O_4$25

Galina RIZAK

INNOVATIVE APPROACHES TO THE SYNTHESIS AND STUDY OF BIOLOGICAL ACTION OF NEW HETEROCYCLIC COMPOUNDS BASED ON AMINOTHIOPHENES.....31

Andrii SELEZEN, Lyubomyr GULAY, Mykola MOROZ, Lyudmyla PISKACH

INTERACTION IN THE $Tl_2Se-Zn(Cd, Hg)Se-GeSe_2$ SYSTEMS.....41

Andrij STETSKIV, Volodymyr PAVLYUK

PHASE EQUILIBRIA IN THE QUATERNARY SYSTEM $La-Li-Ni-Ge$ AT A TEMPERATURE OF 400 °C.....50

ECOLOGY

Kostiantyn GRYGORIEV

EMISSIONS OF CHEMICAL POLLUTANTS BY MOTOR VEHICLES IN THE MYKOLAIV CITY DURING THE WAR.....58

Volodymyr KUCHERENKO, Yuliia TAMARKINA, Anastasia REDKO, Irina FROLOVA

ADSORBENTS OBTAINED BY NITRIC ACID INTERCALATION AND ALKALINE ACTIVATION OF ANTHRACITE.....64

Zoryana LAVRYNYUK, Olha KARAIM, Vira DUBENSKA

ASSESSMENT OF TRAFFIC NOISE IMPACT ON VYNNYCHENKO STREET IN THE CITY OF LUTSK.....77

Liudmyla SAVCHUK, Roman SHULYPA

MONITORING OF STAND MORTALITY IN ZVIRIVSKE FORESTRY.....83

EDUCATIONAL, PEDAGOGICAL SCIENCES. VOCATIONAL EDUCATION

Vasily BARLADIN

ON THE PROBLEM OF IDENTIFYING THE PEDAGOGICAL CONDITIONS FOR TRAINING FUTURE VOCATIONAL TEACHERS IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS IN THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION.....88

Olha HULAI, Oleksandr SUSHYK, Olha REDKO

FUNCTIONS OF THE INFORMATION AND ADVISORY ENVIRONMENT

OF A VOCATIONAL EDUCATION INSTITUTION..... 94

Mykhailo DEMIANCHUK, Olena GASHYNSKA, Olena GORSKA

POSSIBILITIES OF A PERSONALITY-ORIENTED APPROACH IN THE FORMATION

OF COMMUNICATIVE COMPETENCE OF MEDICAL COLLEGE STUDENTS.....102

Nataliya DUB

THE ROLE OF ACADEMIC MOBILITY AS A TOOL FOR INCLUSIVE EDUCATION

OF STUDENTS WITH DISABILITIES IN MEDICAL EDUCATIONAL INSTITUTIONS.....109

Roman LUTSYSHYN

MODELING THE TRAINING OF FUTURE DIGITAL TECHNOLOGY SPECIALISTS

IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS FOR THE USE OF ADAPTIVE SYSTEMS.....115

Svitlana LIULENKO

TYPES OF MASS EXTRACURRICULAR ACTIVITIES IN BIOLOGY,

FEATURES OF PREPARATION AND ORGANIZATION OF MASS EVENTS.....121

ПРОБЛЕМИ ХІМІЇ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Випуск 1

Коректура • Ірина Миколаївна Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Тетяна Олексіївна Клименко

Підписано до друку: 01.05.2025.

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 15,11. Замов. № 0425/304. 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.