

**Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності**

**БІОЛОГІЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ
ЗАГРОЗИ В УМОВАХ ВІЙНИ**

**BIOLOGICAL, CHEMICAL AND
ENVIRONMENTAL THREATS IN WARTIME
CONDITIONS**

*За заг. ред. Василя Поповича, Вікторії Сергієнко,
Наталії Іванченко*

Львів 2026

УДК 504.062:355.48+614.8+502.5+614.2+628.5+005.334+004.942:005.53+711.4

DOI: 10.32447/bcet.2026.00

Рецензенти: **Геник Ярослав В'ячеславович** – доктор сільськогосподарських наук, професор, директор навчально-наукового інституту лісового і садово-паркового господарства Національного лісотехнічного університету України.
Мандрик Олег Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології факультету природничих наук Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.
Оліферчук Вікторія Петрівна – доктор біологічних наук, доцент, професор кафедри екологічної безпеки навчально-наукового інституту цивільного захисту Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

Редакційна колегія колективної монографії:

Попович Василь Васильович – доктор технічних, професор, проректор з наукової роботи Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.
Сергієнко Вікторія Олександрівна – доктор медичних наук, професор, проректор з наукової роботи ДНТ "Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького".
Іванченко Наталія Олександрівна – генеральний директор ДУ "Львівський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України".

Технічні редактори:

Степова Катерина Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник відділу організації науково-дослідної діяльності науково-дослідного центру Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.
Скиба Тетяна Костянтинівна – доктор філософії, науковий співробітник відділу організації науково-дослідної діяльності науково-дослідного центру Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.
Федів Ірина Сергіївна – доктор філософії, головний науковий співробітник відділу організації науково-дослідної діяльності науково-дослідного центру Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

**Рекомендовано до друку Вченою радою Львівського державного університету безпеки життєдіяльності
(протокол № 15 від 17 червня 2026 року.)**

Біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни : колективна монографія / за заг. ред. В. В. Поповича, В. О. Сергієнко, Н. О. Іванченко. Львів : ЛДУБЖД, 2026. 451 с.

Монографія присвячена комплексному аналізу наслідків воєнних дій для населення, довкілля та безпекового середовища, з особливим акцентом на питання біобезпеки та біозахисту, а також пов'язані біологічні, хімічні, екологічні та медико-соціальні ризики. Розглядаються процеси воєнно-екологічної деградації, включно із забрудненням атмосферного повітря, ґрунтів і водних ресурсів, накопиченням небезпечних речовин, впливом пожеж та руйнування критичної інфраструктури на стан довкілля і санітарно-епідемічну ситуацію. Значну увагу приділено біобезпеці населення в умовах війни, зокрема поширенню інфекційних захворювань, загрозам біологічного характеру, ускладненням хронічної патології, впливу стресових факторів, міграційним процесам та стану внутрішньо переміщених осіб. Окремо розглянуто питання біозахисту, епідеміологічного нагляду, імунопрофілактики та готовності системи охорони здоров'я до реагування на біологічні загрози в умовах воєнного стану. Проаналізовано підходи до управління ризиками надзвичайних ситуацій, забезпечення екологічної, пожежної та техногенної безпеки, а також використання цифрових технологій моніторингу, прогнозування та підтримки прийняття рішень у кризових умовах. Узагальнено наукові та прикладні напрацювання, спрямовані на підвищення рівня біобезпеки, біозахисту та стійкості суспільства до наслідків війни.

Представлені у колективній монографії матеріали подані в авторській редакції та відображають власну наукову позицію авторів. Авторі несуть повну відповідальність за точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, наукової термінології, імен власних, джерел посилання та дотримання вимог академічної доброчесності.

© В. В. Попович, 2026
© В. О. Сергієнко, 2026
© Н. О. Іванченко, 2026
© ЛДУБЖД, 2026

ВСТУП

Воєнні конфлікти спричиняють комплексні та довготривалі наслідки для довкілля, громадського здоров'я, техногенної безпеки, критичної інфраструктури та систем реагування на надзвичайні ситуації. В умовах повномасштабної війни в Україні особливої актуальності набувають питання виявлення, оцінювання та мінімізації біологічних, хімічних, радіаційних і екологічних загроз, що виникають унаслідок бойових дій, руйнування інфраструктури, забруднення природного середовища та зростання ризиків техногенних аварій.

27 травня 2026 року на базі Львівського державного університету безпеки життєдіяльності відбулася II Міжнародна науково-практична конференція ВСЕТ 2026 «Біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни». Захід об'єднав науковців, фахівців у сфері цивільного захисту, охорони здоров'я, екологічної безпеки, управління ризиками, представників закладів вищої освіти, наукових установ і практичних підрозділів для обговорення актуальних викликів, пов'язаних із впливом війни на довкілля, здоров'я населення та безпеку територій.

Метою конференції була консолідація наукового, освітнього й практичного потенціалу для визначення актуальних проблем і перспектив реагування на біологічні, хімічні, радіаційні та екологічні загрози в умовах воєнного стану, а також напрацювання практико-орієнтованих підходів для підвищення готовності служб реагування, медичних установ, системи громадського здоров'я, органів державної влади та місцевого самоврядування до дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій.

Колективна монографія об'єднує праці авторів із різних галузей знань, зокрема екології, медицини, епідеміології, мікробіології, хімічної безпеки, громадського здоров'я, цивільного захисту, інформаційних технологій та управління ризиками. Її структура охоплює три взаємопов'язані напрями: хімічну, радіаційну та екологічну безпеку в умовах війни й техногенного навантаження; біологічну безпеку та громадське здоров'я у воєнний час; безпеку, управління ризиками та рішення в надзвичайних ситуаціях.

У колективній монографії розглянуто питання трансформації ґрунтового середовища, екологічних наслідків збройних конфліктів, забруднення довкілля, впливу пожеж, якості питної води, біологічних та інфекційних загроз, біотероризму, імунопрофілактики, епідемічного нагляду, медико-екологічних наслідків війни, а також сучасних підходів до управління ризиками, використання штучного інтелекту, дистанційного моніторингу, кібербезпеки медичної інформації та цифрових інструментів захисту об'єктів підвищеної небезпеки.

Цінність монографії полягає у поєднанні теоретичних узагальнень із результатами прикладних досліджень, аналізом реальних загроз і практичними підходами до підвищення ефективності систем моніторингу, профілактики та реагування. Видання орієнтоване на науковців, викладачів, здобувачів вищої освіти, фахівців у сфері цивільного захисту, охорони здоров'я, екологічної безпеки й управління надзвичайними ситуаціями.

Сподіваємося, що колективна монографія стане внеском у розвиток наукового підґрунтя для протидії сучасним біологічним, хімічним, радіаційним та екологічним загрозам, сприятиме пошуку ефективних рішень у сфері безпеки та посиленню стійкості суспільства в умовах воєнних і повоєнних викликів.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1

ХІМІЧНА, РАДІАЦІЙНА ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА В УМОВАХ ВІЙНИ ТА ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

CHEMICAL, RADIATION, AND ENVIRONMENTAL SAFETY IN WARTIME CONDITION AND TECHNOGENIC STRESS

Korol K.

Assessment of soil environment transformation under potential military and technogenic impact

(Король К. Оцінка трансформації ґрунтового середовища в умовах потенційного воєнного та техногенного впливу).....

8

Бужанська М.

Екологічні наслідки сучасних збройних конфліктів: системний аналіз та виклики

(Buzhanska M. Environmental consequences of modern armed conflicts: systematic analysis and challenges).....

17

Дочинець В.

Формування просторових градієнтів важких металів у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів у різні сезони року

(Dochynets V. Formation of spatial gradients of heavy metals in soils of the Uzhhorod municipal waste landfill during different seasons of the year).....

42

Іляшевич М.

Особливості впливу пожеж у Карпатському лісогосподарському районі на довкілля

(Iliashevych M. Features of the impact of fires in the Carpathian forestry region on the environment).....

52

Смолій Н.

Екологічні ризики забруднення ґрунту пер- та поліфторалкільними речовинами

(Smoliy N. Environmental risks of soil contamination by per- and polyfluoroalkyl substances).....

61

Хондак І.

Вплив погіршення стану довкілля та зміни клімату на екологічну безпеку

(Khondak I. The impact of environmental degradation and climate change on environmental security).....

71

Хром'як У.

Аналіз фізико-хімічних показників питної води з колодязів у селищах Комарівка та Підлиман Харківської області

(Khromiak U. Analysis of physico-chemical parameters of drinking water from wells in the settlements of Komarivka and Pidlyman, Kharkiv Region).....

83

РОЗДІЛ 2

БІОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ГРОМАДСЬКЕ ЗДОРОВ'Я В УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ

BIOLOGICAL SAFETY AND PUBLIC HEALTH IN WARTIME

Komplikevych S., Maslovska O., Hnatush A., Zaritska Ye., Telehuz O., Hnatush S. Changes in the soil microbiome of a military training ground (Комплікевич С., Масловська О., Гнатуш А., Зарицька Є., Телегуз О., Гнатуш С. Зміни мікробіому ґрунтів навчального військового полігону).....	103
Гута С., Кобак Л., Бекесевич А. Трансформація біологічних загроз в умовах воєнних конфліктів: нові інфекційні виклики, біотероризм та медико-екологічні наслідки (Huta S., Kobak L., Bekesevych A. Transformation of biological threats in the context of military conflicts: new infectious challenges, bioterrorism and medical-environmental consequences).....	134
Заяць М., Заяць З., Корнійчук І. Високоризикові лікарські засоби: їх місце у тактичній медицині: історичні та сучасні аспекти (Zaiats M., Zaiats Z., Korniiichuk I. High-risk medicines: their role in tactical medicine: historical and modern aspects).....	143
Звір Г. Азотофіксувальні мікроорганізми в умовах хімічної загрози: реакція <i>Azotobacter</i> sp. на пестициди та протипожежні піни (Zvir H. Nitrogen-fixing microorganisms under chemical threat: response of <i>Azotobacter</i> sp. to pesticides and firefighting foams).....	153
Іванченко Н., Сергієнко В., Кунинець О., Литвин Г. Захворюваність на рак шийки матки у Львівській області за період 2020–2024 рр. (Ivanchenko N., Serhiienko V., Kunynets O., Lytvyn H. Cervical cancer incidence in Lviv Region for the period 2020–2024).....	178
Іванченко Н., Сергієнко В., Цепак Д., Литвин Г. Підсумки епідемічного сезону захворюваності на грип та ГРВІ 2025–2026 років (Ivanchenko N., Serhiienko V., Tsepak D., Lytvyn H. Summary of the 2025–2026 epidemic season of influenza and acute respiratory viral infections).....	186
Кігічак-Борщевська А. Виклики сьогодення та сучасні різновиди адиктивної поведінки у підлітків та молоді (Kihichak-Borshchevska A. Current challenges and modern forms of addictive behavior among adolescents and young adults).....	193

Литвин Г., Стасів М.

Клініко-імунологічні особливості перебігу COVID-19 та мультисистемного запального синдрому у дітей, асоційованого із SARS-CoV-2

(Lytvyn H., Stasiv M. Clinical and immunological features of COVID-19 and multisystem inflammatory syndrome in children associated with SARS-CoV-2)..... 209

Сахелашвілі М., Піскур З., Сахелашвілі-Біль О.

Еволюція патоморфозу туберкульозного ураження ЦНС у хворих із ВІЛ/СНІД-інфекцією за даними клініко-морфологічного аналізу

(Sakhelashvili M., Piskur Z., Sakhelashvili-Bil O. Evolution of the pathomorphosis of central nervous system tuberculosis in patients with HIV/AIDS infection according to clinical and morphological analysis)..... 294

Сергієнко В., Сергієнко О.

Посттравматичний стресовий розлад, цукровий діабет 2 типу і вітамін В12

(Serhiienko V., Serhiienko O. Post-traumatic stress disorder, type 2 diabetes, and vitamin B12)..... 321

Сергієнко В., Чемерис О., Іванченко Н., Сергієнко О.

War exposome, ендокринні дизруптори та важкі метали у структурі сучасної екотоксикології війни

(Serhiienko V., Chemerys O., Ivanchenko N., Serhiienko O. The war exposome, endocrine disruptors, and heavy metals in the framework of modern war ecotoxicology)..... 332

Скрипник С., Біломеря Т., Шишова Г.

Підготовка медичних працівників з питань імунопрофілактики як складова біобезпеки в умовах війни: результати опитування у Донецькій області

(Skrypnik S., Bilomeria T., Shyshova H. Training of healthcare professionals on immunoprophylaxis as a component of biosafety in wartime: results of a survey in Donetsk Region)..... 353

РОЗДІЛ 3

БЕЗПЕКА, УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ТА РІШЕННЯ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

SAFETY, RISK MANAGEMENT, AND EMERGENCY RESPONSE

Jeđrasiak K.

Artificial intelligence-supported field recognition of biological, chemical and environmental threats in wartime

(Єндрасяк К. Розпізнавання біологічних, хімічних та екологічних загроз у польових умовах із підтримкою штучного інтелекту під час війни)..... 361

Obikhod T., Bilenchuk P.

Hybrid pinn–lstm architecture for predicting the dispersion of chemical emissions in the atmosphere

(Обіход Т., Біленчук П. Гібридна архітектура pinn–lstm для прогнозування розсіювання хімічних викидів в атмосфері)..... 380

Журбинський Д., Нуянзін В., Даник О.

Обґрунтування іновативних підходів підвищення кваліфікації співробітників ДСНС України у сфері біологічного захисту та біологічної безпеки

(Zhurbynskiy D., Nuianzin V., Danyk O. Substantiation of innovative approaches to advanced training of employees of the state emergency service of ukraine in the field of biological protection and biosafety)..... 392

Магась Н.

Дистанційний моніторинг пожежного навантаження на об'єкти природно-заповідного фонду півдня України у воєнний період

(Mahas N. Remote monitoring of fire load on protected areas of southern Ukraine during wartime)..... 401

Макух Х., Ривак Т., Федоришин Т.

Кібербезпека медичної інформації як складова реагування системи охорони здоров'я на біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни

(Makukh Kh., Ryvak T., Fedoryshyn T. Cybersecurity of medical information as a component of the healthcare system's response to biological, chemical and environmental threats in wartime)..... 426

Савченко О., Стацюк А., Гарькава Н.

Концепція захисту об'єктів підвищеної небезпеки від техногенних та воєнних загроз на основі цифрової тіні та цифрового фантома

(Savchenko O., Statsiuk A., Harkava N. Concept of protecting high-risk facilities from technogenic and military threats based on a digital shadow and a digital phantom)..... 440

**РОЗДІЛ 1. ХІМІЧНА, РАДІАЦІЙНА ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА
В УМОВАХ ВІЙНИ ТА ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

**CHAPTER 1. CHEMICAL, RADIATION, AND ENVIRONMENTAL
SAFETY IN WARTIME CONDITION AND TECHNOGENIC STRESS**

**ASSESSMENT OF SOIL ENVIRONMENT TRANSFORMATION UNDER
POTENTIAL MILITARY AND TECHNOGENIC IMPACT**

**ОЦІНКА ТРАНСФОРМАЦІЇ ҐРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА В УМОВАХ
ПОТЕНЦІЙНОГО ВОЄННОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ**

Kateryna Korol, PhD, Research Fellow, Scientific Research Laboratory of Environmental Safety, Educational and Scientific Institute of Civil Protection, Lviv State University of Life Safety, katikincheshi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4363-6933>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.01>

Abstract. The study investigates the transformation of the soil environment within the territories of Kharkiv Oblast under conditions of potential military and technogenic impact. The physicochemical parameters of 11 soil samples collected from areas characterized by increased anthropogenic pressure and possible consequences of military activity were analyzed. The study included the determination of soil pH, moisture content, and FTIR identification of potentially hazardous chemical compounds using the portable Thermo Scientific TruDefender analyzer. The investigated soils were found to be predominantly alkaline, with pH values ranging from 8.0 to 9.2. A pronounced spatial heterogeneity of soil moisture indicators was identified, indicating local changes in the physicochemical state of the surface soil horizon. FTIR analysis revealed spectral matches with potentially hazardous compounds, including mercury sulfate, sodium fluoroborate, palladium oxide, and several nitrogen-containing compounds. The obtained results indicate signs of transformation in the chemical composition of the soil environment and confirm the feasibility of using portable FTIR analyzers for rapid environmental monitoring of potentially hazardous territories. Spatial modeling performed in the Surfer software environment made it possible to identify local zones of increased technogenic pressure and spatial heterogeneity of soil physicochemical characteristics. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the obtained results for environmental risk assessment, forecasting degradation processes, and improving environmental monitoring systems for territories affected by military and technogenic factors.

Keywords: soil environment, military impact, technogenic pressure, FTIR analysis, environmental monitoring, soil transformation, acid-base balance, spatial analysis, Kharkiv Oblast, potentially hazardous substances, Thermo Scientific TruDefender, municipal waste landfills.

Анотація. У роботі досліджено трансформацію ґрунтового середовища територій Харківської області в умовах потенційного воєнного та техногенного впливу. Проаналізовано фізико-хімічні показники 11 зразків ґрунту, відібраних у межах територій із підвищеним антропогенним навантаженням та можливими наслідками бойових дій. У процесі дослідження визначено кислотно-

лужну реакцію середовища, вологість ґрунтів та проведено FTIR-ідентифікацію потенційно небезпечних хімічних сполук із використанням портативного аналізатора Thermo Scientific TruDefender. Встановлено, що досліджувані ґрунти характеризуються переважно лужною реакцією середовища, при цьому значення рН змінювалися у межах 8,0–9,2. Зафіксовано виражену просторову неоднорідність показників вологості ґрунтів, що свідчить про локальні зміни фізико-хімічного стану поверхневого горизонту. За результатами FTIR-аналізу виявлено спектральні відповідності потенційно небезпечним сполукам, зокрема сульфату ртуті, фторборату натрію, паладій оксиду та окремим азотовмісним компонентам. Отримані результати свідчать про ознаки трансформації хімічного складу ґрунтового середовища та підтверджують доцільність використання портативних FTIR-аналізаторів для оперативного екологічного моніторингу територій потенційного ризику. Просторове моделювання результатів у програмному середовищі Surfer дозволило виявити локальні зони підвищеного техногенного навантаження та просторову неоднорідність фізико-хімічних характеристик ґрунтів. Практична цінність дослідження полягає у можливості застосування отриманих результатів для оцінки екологічних ризиків, прогнозування деградаційних процесів та удосконалення систем екологічного моніторингу територій, що зазнають впливу воєнних і техногенних чинників.

Ключові слова: ґрунтове середовище, воєнний вплив, техногенне навантаження, FTIR-аналіз, екологічний моніторинг, трансформація ґрунтів, кислотно-лужний баланс, просторовий аналіз, Харківська область, потенційно небезпечні речовини, Thermo Scientific TruDefender, полігони побутових відходів.

INTRODUCTION

Modern military conflicts are accompanied by large-scale transformation of the natural environment and the emergence of new environmental risks, among which soil degradation occupies a special place. Mechanical destruction of surface horizons, accumulation of combustion products, explosive residues, fuels and lubricants, and other toxic components lead to changes in the physicochemical properties of soils, disruption of biogeochemical cycles, and destabilization of natural ecosystems¹. Under martial law conditions, particular importance is attached to assessing soil environment transformation within territories exposed to combined technogenic and military pressure.

Soils are among the key components of ecosystems, as they regulate the migration of chemical elements, accumulate organic matter, maintain biodiversity, and ensure the stability of landscape systems. Disturbances in acid-base balance, changes in moisture content, and accumulation of toxic substances directly affect the mobility of heavy metals, sorption properties of soils, and bioavailability of hazardous compounds². Under such conditions, secondary contamination processes intensify and may pose a threat to surface and groundwater systems, vegetation cover, and human health.

Recent studies indicate that territories affected by military activities are characterized by significant spatial heterogeneity of soil physicochemical properties and the formation of local zones of toxic substance accumulation³. Explosive processes, infrastructure destruction, and deposition of combustion products alter

¹ Solokha M. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict. Land. 2024. Vol. 13(10). P. 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>

² Alloway B. J. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Springer. 2023. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1222-2>

³ Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F. Soil contamination in areas impacted by military activities: A critical review. Sustainability. 2020. Vol. 12(21). P. 9002. <https://doi.org/10.3390/su12219002>

the mineral composition of the surface soil horizon, disrupt sorption processes, and intensify the migration of potentially hazardous compounds.

Assessment of spatial heterogeneity of contamination and the application of rapid environmental monitoring methods have become particularly important in modern ecological research⁴. Spatial analysis enables the identification of local zones of soil transformation and assessment of territories with elevated levels of potential environmental risk.

One of the promising approaches for rapid environmental monitoring is the application of portable FTIR analyzers, which provide the possibility of express identification of chemical compounds directly under field conditions⁵. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) makes it possible to analyze the spectral characteristics of substances and identify signs of transformation in the chemical composition of soils⁶.

Modern approaches to assessing environmental and technogenic hazards involve combining physicochemical soil analysis with geoinformation and spectroscopic research methods. Such an integrated approach enables rapid identification of local environmental risk zones, assessment of edaphotope transformation, and prediction of potential degradation processes⁷. The importance of comprehensive assessment of technogenically transformed territories is also confirmed by recent studies on environmental risks associated with municipal waste landfills and disturbed lands⁸.

The aim of the study is to assess soil environment transformation based on physicochemical indicators and FTIR identification of potentially hazardous substances within territories of Kharkiv Oblast exposed to potential military and technogenic impacts.

METHODOLOGY

Within the framework of the study, 11 soil samples collected from the territory of Kharkiv Oblast in areas exposed to potential military and technogenic impacts were analyzed. Sampling was carried out within territories characterized by anthropogenic pressure, possible consequences of military activities, local zones of technogenic transformation, and potential deposition of combustion products and chemical compounds into the soil environment. Spatial referencing of sampling locations was performed at the administrative-territorial level without indicating exact geographic coordinates due to security restrictions under martial law conditions.

Soil samples were collected from the surface soil horizon, which is most actively affected by atmospheric deposition of pollutants, combustion products, and technogenically transformed components. The selection of the surface layer was determined by the fact that this horizon is characterized by intensive accumulation of toxic compounds and the formation of primary physicochemical transformations of the soil environment⁹.

During field investigations, the main physicochemical characteristics of soils were determined, including temperature, moisture content, and acid-base reaction (pH). Soil temperature was recorded

⁴ Hou D., O'Connor D., Nathanail P. et al. Integrating GIS and machine learning for soil contamination assessment and spatial analysis: A review. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 857. P. 159321. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159321>

⁵ Liu Y., Ma X., Wang Y. Portable spectroscopy for environmental monitoring and contaminant assessment: Recent advances and applications. *Environmental Research*. 2022. Vol. 214. P. 113834. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113834>

⁶ Griffiths P. R., De Haseth J. A. *Fourier Transform Infrared Spectrometry*. Wiley. 2021. <https://doi.org/10.1002/9781119450464>

⁷ Popovych V. V., Apenko I., Dziubenko B. Optimization of fire station locations to increase ecosystem efficiency during natural ecosystems. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2022. Vol. 78(2). P. 47–57

⁸ Korol K. A., Popovych V. V., Shuplat T. I. *Ecological and Technogenic Hazards of Municipal Waste Landfills in Lviv Region*. Lviv: LSU LS, 2025

⁹ Solokha M. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict. *Land*. 2024. Vol. 13(10). P. 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>

directly during field surveys under stable weather conditions. Soil moisture was determined as a percentage parameter, since it significantly influences the migration of dissolved compounds, the intensity of physicochemical processes, and the sorption properties of the soil environment¹⁰.

The acid-base reaction of soils was determined using the potentiometric method with repeated measurements for each sample followed by calculation of average pH values. Soil pH is considered one of the most informative indicators for assessing soil transformation processes because changes in acid-base balance directly affect the mobility of heavy metals, bioavailability of toxic compounds, and intensity of biogeochemical processes¹¹.

Rapid identification of potentially hazardous chemical compounds was performed using the portable FTIR analyzer Thermo Scientific TruDefender. The instrument operates based on Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), which enables rapid field identification of unknown substances according to their spectral characteristics¹².

The operational principle of the FTIR analyzer is based on recording infrared absorption spectra of investigated substances. The obtained spectra were compared with the reference spectral library integrated into the Thermo Scientific TruDefender software, enabling preliminary identification of chemical compounds and determination of spectral matches. The analysis was conducted directly under field conditions, allowing rapid assessment of the possible presence of technogenically transformed components within the soil environment¹³.

The FTIR analysis results were interpreted as indicative signs of the possible presence of certain chemical substances or compounds with similar spectral characteristics. The obtained spectral matches were not interpreted as quantitative concentration measurements because portable FTIR analyzers are primarily intended for qualitative rapid identification of substances under field conditions. Particular attention was focused on identifying spectral features of potentially hazardous compounds capable of affecting soil physicochemical properties and forming local environmental risks.

During interpretation of the obtained results, special attention was paid to the analysis of changes in soil acid-base balance, spatial variability of moisture indicators, and possible signs of technogenic transformation of the surface horizon. The integrated approach combining physicochemical assessment and FTIR identification enables a more objective evaluation of the ecological condition of territories affected by military and technogenic factors¹⁴.

Comparative analysis of physicochemical indicators and descriptive environmental assessment methods were applied for generalization of the obtained results. Visualization of spatial heterogeneity of the studied parameters was performed using thematic maps, graphical models, and interpolation surfaces generated in the Surfer software environment. Spatial modeling allows identification of local zones of soil transformation, determination of gradients of physicochemical parameter changes, and assessment of territories characterized by elevated levels of potential environmental hazard¹⁵.

¹⁰ Hou D., O'Connor D., Nathanail P. et al. Integrating GIS and machine learning for soil contamination assessment and spatial analysis: A review. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 857. P. 159321. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159321>

¹¹ Alloway B. J. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Springer. 2023. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1222-2>

¹² Griffiths P. R., De Haseth J. A. *Fourier Transform Infrared Spectrometry*. Wiley. 2021. <https://doi.org/10.1002/9781119450464>

¹³ Liu Y., Ma X., Wang Y. Portable spectroscopy for environmental monitoring and contaminant assessment: Recent advances and applications. *Environmental Research*. 2022. Vol. 214. P. 113834. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113834>

¹⁴ Korol K. A., Popovych V. V., Shuplat T. I. *Ecological and Technogenic Hazards of Municipal Waste Landfills in Lviv Region*. Lviv: LSU LS, 2025

¹⁵ Popovych V. V., Apenko I., Dziubenko B. Optimization of fire station locations to increase ecosystem efficiency during natural ecosystems. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2022. Vol. 78(2). P. 47–57

RESULTS

The results presented in Figure 1 demonstrate pronounced spatial variability of the acid-base condition of the soil environment within the studied territories of Kharkiv Oblast. The highest pH values were associated with specific local areas located in the eastern and northeastern parts of the investigated territory. The formation of such anomalies may be related to the heterogeneous nature of technogenic pressure, local accumulation of combustion products, deposition of ash residues, and changes in the mineral composition of the surface soil horizon caused by military and anthropogenic impacts. Similar patterns of spatial heterogeneity of edaphotopes have been described in studies devoted to technogenically disturbed territories and municipal waste landfill environments, where local physicochemical anomalies are formed due to uneven accumulation of pollutants and transformation of soil structure.

Analysis of pH values demonstrated that all investigated samples were characterized by predominantly alkaline conditions. The average pH values ranged from 8.0 to 9.2, exceeding neutral conditions and indicating possible transformation of the natural acid-base balance of the soil cover¹⁶.

The highest pH values were recorded in samples No. 4, No. 6, and No. 7, where the indicators exceeded 9.0. Such alkalinity levels are not typical for stable natural soil systems and may indicate active transformation processes within the surface soil horizon. Elevated pH values are often associated with the accumulation of combustion products, ash residues, fragments of concrete and construction materials, as well as mineral components entering the soil environment due to infrastructure destruction and explosive processes¹⁷.

Changes in acid-base balance directly affect the ecological stability of soils. Under alkaline conditions, transformation of sorption properties occurs within the surface layer, migration capacity of certain chemical elements changes, and the functioning of soil microbiota may be disrupted. Elevated pH values may also contribute to the formation of local zones of toxic compound accumulation and influence the bioavailability of heavy metals¹⁸.

Under conditions of increased alkalinity, the physicochemical behavior of numerous pollutants changes substantially. Heavy metals may form both insoluble precipitates and mobile complex compounds depending on environmental conditions, moisture regime, and mineral composition of soils. Disturbance of the natural acid-base equilibrium may also reduce biological activity of soil microorganisms and negatively affect nutrient cycling processes within the ecosystem. Long-term alkalization of soils may therefore become one of the factors contributing to degradation of ecological functions of the soil environment.

The identified spatial heterogeneity of pH values additionally indicates that transformation processes occur unevenly across the investigated territories. Such variability may be associated with differences in the intensity of local military impact, deposition of combustion residues, destruction of infrastructure objects, and accumulation of technogenic materials within specific sectors of the studied territory. Localized alkaline anomalies may therefore serve as indirect indicators of zones subjected to increased anthropogenic and military-related pressure.

The obtained results confirm that physicochemical indicators of soils can be effectively used for rapid environmental assessment of territories affected by technogenic and military impacts. Changes in pH values represent an important diagnostic criterion reflecting the intensity of transformation processes within the surface soil horizon and the degree of disturbance of natural geochemical conditions.

¹⁶ Alloway B. J. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Springer. 2023. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1222-2>

¹⁷ Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F. Soil contamination in areas impacted by military activities: A critical review. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(21). P. 9002. <https://doi.org/10.3390/su12219002>

¹⁸ Alloway B. J. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Springer. 2023. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1222-2>

The results of the spatial distribution of soil pH values are presented in Figure 1.

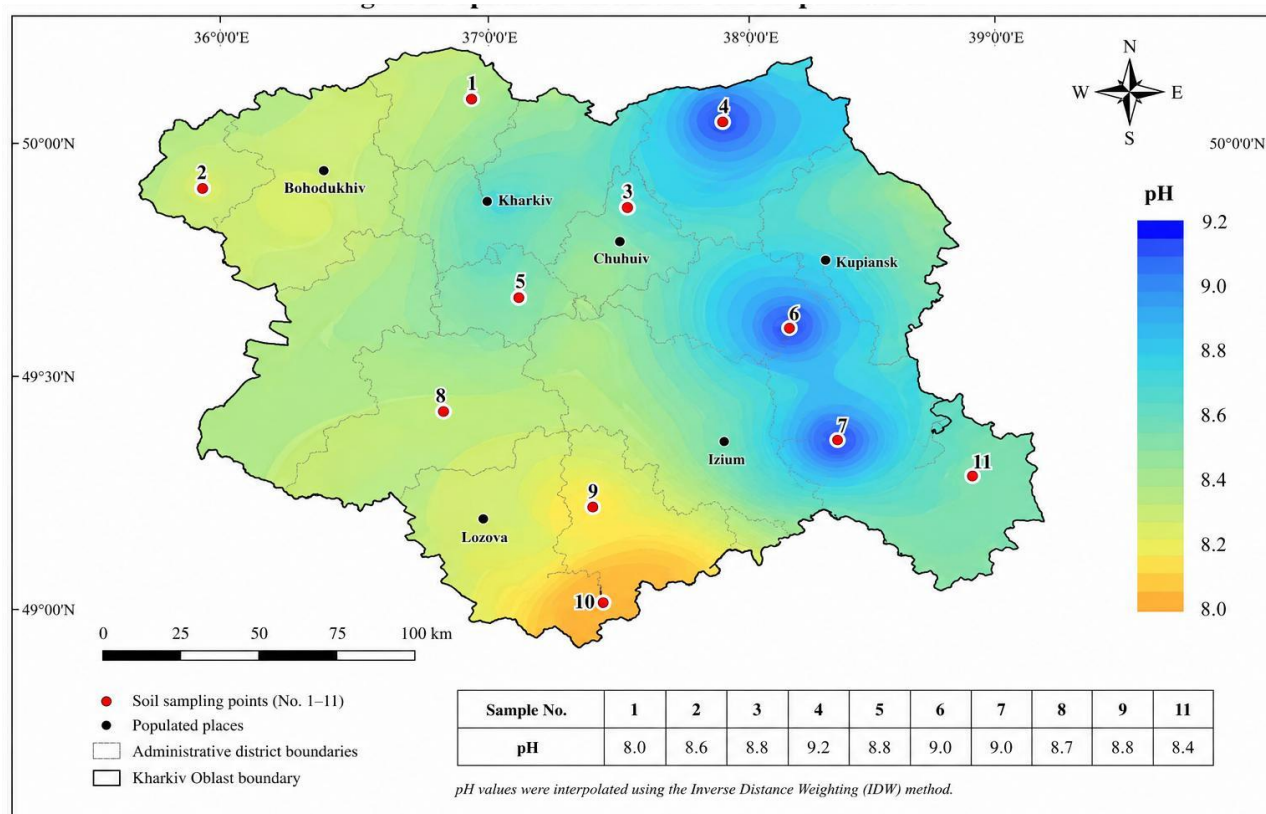


Figure 1. Spatial Distribution of Soil pH Values in the Studied Samples

The results presented in Figure 1 demonstrate pronounced spatial variability of the acid-base condition of the soil environment within the studied territories of Kharkiv Oblast. The highest pH values were associated with specific local areas located in the eastern and northeastern parts of the investigated territory. The formation of such anomalies may be related to the heterogeneous nature of technogenic pressure, local accumulation of combustion products, deposition of ash residues, and changes in the mineral composition of the surface soil horizon caused by military and anthropogenic impacts. Similar patterns of spatial heterogeneity of edaphotopes have been described in studies devoted to technogenically disturbed territories and municipal waste landfill environments, where local physicochemical anomalies are formed due to uneven accumulation of pollutants and transformation of soil structure.

Elevated pH values observed in several investigated samples indicate the disturbance of the natural acid-base balance of soils and may reflect intensive physicochemical transformation processes occurring within the surface horizon. Under alkaline conditions, the mobility of individual chemical elements and toxic compounds changes significantly, while the sorption capacity of soils may be altered. Such transformations can affect the intensity of biogeochemical processes, disrupt the functioning of soil microbiota, and contribute to the formation of local zones characterized by increased environmental risk. In addition, long-term shifts in acid-base conditions may influence nutrient availability and lead to deterioration of ecological stability within disturbed ecosystems.

Soil moisture indicators were also characterized by considerable heterogeneity. Moisture values ranged from 28.5% to 48.6%, indicating different moisture conditions within the surface soil layer and varying intensity of physicochemical processes across the investigated territories. The highest moisture levels were recorded in samples No. 1 and No. 11, whereas the lowest values were observed in samples No.

2 and No. 10. Such variability demonstrates that the investigated territories differ significantly in their hydrological regime and water-retention characteristics.

Spatial heterogeneity of moisture distribution may be associated both with local natural conditions and with disturbances in the structure of the surface soil horizon caused by mechanical and technogenic impacts. Soil compaction, destruction of natural aggregation, alteration of granulometric composition, and accumulation of technogenic materials may substantially affect infiltration processes and the capacity of soils to retain water. In territories exposed to military activities, additional factors influencing soil moisture conditions include crater formation, destruction of vegetation cover, changes in surface runoff patterns, and accumulation of combustion residues within depressions of the microrelief.

Elevated moisture levels create favorable conditions for intensified migration of dissolved compounds, including potentially toxic substances and mobile forms of heavy metals. Increased water content may enhance vertical and horizontal migration of contaminants through the soil profile and facilitate their transport into adjacent environmental components, particularly groundwater and surface water systems. Under such conditions, even local contamination sources may contribute to broader environmental degradation processes and increase ecological risks for neighboring territories.

The combination of elevated moisture content and alkaline environmental conditions may contribute to the transformation of sorption processes, changes in the migration capacity of toxic compounds, and the formation of unstable geochemical conditions within the surface soil horizon. Under alkaline conditions, some heavy metals may become less mobile, while others may form soluble complexes capable of migrating within the soil environment. Simultaneously, changes in soil moisture significantly influence the intensity of physicochemical reactions, dissolution of mineral components, and redistribution of contaminants between solid and liquid phases.

The obtained results indicate that the investigated territories are characterized by active local transformation processes associated with technogenic and potentially military-related impacts. Spatial variability of pH and moisture indicators demonstrates that soil transformation occurs unevenly and depends on the intensity of local disturbances, physicochemical composition of deposited materials, and hydrological conditions of individual sites. Such heterogeneity complicates environmental assessment of disturbed territories and confirms the necessity of applying spatial analysis methods for identifying local ecological anomalies.

Under conditions of prolonged technogenic and military pressure, the identified physicochemical transformations may become one of the key factors contributing to degradation of soil ecosystems, reduction of biological productivity, disturbance of natural migration barriers, and intensification of secondary contamination processes. Therefore, monitoring of physicochemical soil parameters represents an important component of environmental assessment systems aimed at identifying potentially hazardous territories and forecasting further degradation processes.

To visualize the spatial heterogeneity of soil moisture, a corresponding graphical model was developed (Figure 2).

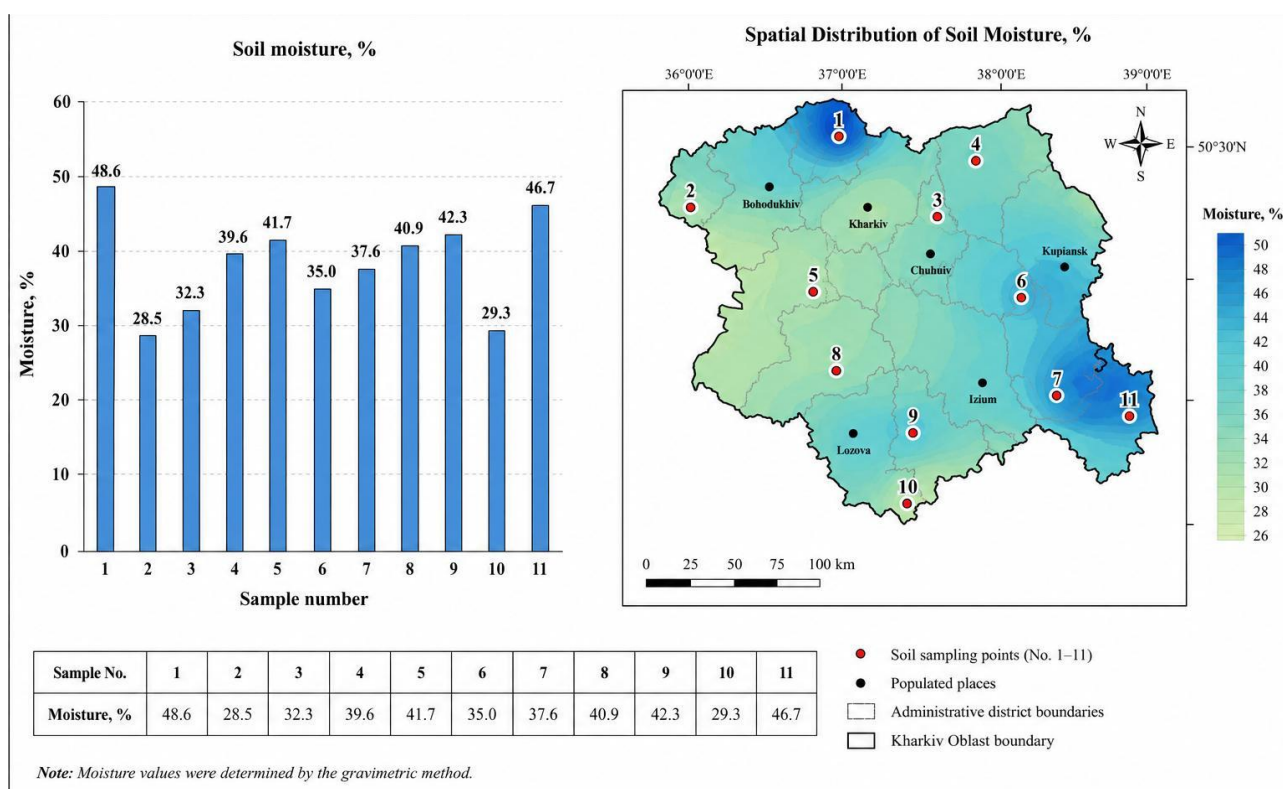


Figure 2. Variability of Soil Moisture in the Studied Samples

The results presented in Figure 2 demonstrate substantial spatial heterogeneity of soil moisture within the studied territory. The most humidified areas were confined to the northern and eastern parts of the investigated region, whereas local zones characterized by reduced moisture levels were observed in the southern sector. Such a distribution pattern may indicate uneven influence of technogenic processes, alteration of the physical structure of soils, and disturbance of the natural hydrological regime of the surface soil horizon.

The obtained results indicate the presence of local transformation processes within the studied territories. The combination of elevated pH values and significant variability of soil moisture may suggest disturbance of the natural functioning of the soil environment under conditions of potential military and technogenic impact.

CONCLUSION

As a result of the conducted research, it was established that the soil environment of the studied territories within Kharkiv Oblast is characterized by signs of physicochemical transformation under conditions of potential military and technogenic impact. Analysis of physicochemical indicators demonstrated the predominantly alkaline nature of the investigated soils, with pH values ranging from 8.0 to 9.2. The highest pH values were recorded in samples No. 4, No. 6, and No. 7, indicating the local formation of technogenically transformed zones within the surface soil horizon. Such changes may be associated with the accumulation of combustion products, mineral components, construction debris, and other substances capable of altering the natural acid-base balance of the soil environment.

Significant spatial variability of soil moisture indicators was also identified, reflecting heterogeneity of the surface horizon functioning and different intensities of physicochemical processes within the investigated territories. Moisture values ranged from 28.5% to 48.6%, with the highest values observed in samples No. 1 and No. 11. The obtained results indicate disturbance of the natural hydrological regime of soils and changes in their water-retention properties. The combination of elevated moisture levels and

alkaline environmental conditions creates favorable conditions for intensified migration of dissolved compounds, transformation of sorption processes, and formation of local zones of secondary contamination.

The results of spatial analysis confirmed pronounced heterogeneity in the distribution of physicochemical indicators across the studied territories. Local zones characterized by elevated pH and moisture values were identified, which may indicate different intensities of technogenic pressure and uneven transformation of the soil environment. Such spatial variability represents an important indicator of disturbed natural functioning of edaphotopes and confirms the feasibility of applying geoinformation approaches for environmental monitoring of disturbed territories.

According to the FTIR analysis results obtained using the portable Thermo Scientific TruDefender analyzer, spectral matches corresponding to potentially hazardous compounds were identified in several investigated samples, including mercury sulfate, sodium fluoroborate, palladium oxide, triacetoxymethylborane, and certain nitrogen-containing compounds. Detection of such spectral features may indicate transformation of the chemical composition of the surface soil horizon and the introduction of technogenically altered components into the soil environment. Particular environmental concern is associated with substances characterized by potential toxic effects and the ability to accumulate within environmental components.

The obtained results confirm that the use of portable FTIR analyzers represents a promising direction for rapid environmental monitoring of potentially hazardous territories. The integration of physicochemical soil analysis with spectroscopic technologies enables comprehensive assessment of soil environment transformation, identification of local zones of potential environmental hazard, and evaluation of spatial heterogeneity of contamination.

The practical significance of the conducted research lies in the possibility of applying the obtained results to improve environmental monitoring systems for territories affected by military activities and technogenic processes. The identified patterns of soil environment transformation may be used for environmental risk assessment, prediction of degradation processes, identification of priority ecological control zones, and development of measures aimed at ensuring environmental safety of disturbed territories.

**ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ СУЧАСНИХ ЗБРОЙНИХ КОНФЛІКТІВ:
СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА ВИКЛИКИ**

**ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF MODERN ARMED CONFLICTS:
SYSTEMATIC ANALYSIS AND CHALLENGES**

Бужанська Маріанна Василівна, к.х.н., доцент, Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів, Україна, buganskam@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-9251-4727>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.02>

Анотація. У статті досліджено екологічні наслідки сучасних збройних конфліктів на прикладі війни в Україні як одного з наймасштабніших екологічних викликів ХХІ століття. Актуальність теми зумовлена зростанням масштабів антропогенного навантаження на природне середовище в умовах воєнних дій, руйнуванням критичної інфраструктури, посиленням кліматичних ризиків та необхідністю формування ефективних механізмів післявоєнного екологічного відновлення. Сучасні війни спричиняють довготривалі та комплексні зміни екосистем, що виходять за межі локального впливу та набувають транскордонного й глобального характеру. Метою дослідження є здійснення системного аналізу екологічних наслідків сучасних збройних конфліктів, визначення основних напрямів деградації природного середовища внаслідок бойових дій, а також обґрунтування необхідності комплексного підходу до оцінювання екологічної шкоди та післявоєнного відновлення територій. У роботі обґрунтовано, що сучасна війна є не лише безпековою та гуманітарною кризою, а й потужним чинником довготривалої трансформації природного середовища. Досліджено основні типи екологічних впливів, що виникають унаслідок бойових дій, руйнування інфраструктури та функціонування військово-промислових систем. Визначено, що найбільш масштабними наслідками є забруднення ґрунтів і водних ресурсів токсичними речовинами, важкими металами, нафтопродуктами та продуктами горіння, які формують стійке техногенне навантаження на екосистеми. Проаналізовано атмосферне забруднення та кліматичні ефекти війни, зокрема зростання викидів парникових газів унаслідок пожеж, руйнування енергетичної інфраструктури, переміщення населення та військової діяльності. Встановлено, що екологічні наслідки збройних конфліктів мають кумулятивний і транскордонний характер, а їх вплив поширюється далеко за межі територій безпосереднього ведення бойових дій. Окрему увагу приділено деградації екосистем і втраті біорізноманіття, що супроводжується руйнуванням природних середовищ існування, фрагментацією ландшафтів та порушенням екологічної рівноваги. Розглянуто радіаційні та хімічні ризики, які виникають унаслідок пошкодження промислових і потенційно небезпечних об'єктів. Наголошено на необхідності застосування міждисциплінарного підходу до оцінювання екологічної шкоди, удосконалення систем екологічного моніторингу, управління екологічними ризиками та розроблення стратегій сталого післявоєнного відновлення. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення природоохоронної політики, розвитку систем екологічної безпеки та формування міжнародних механізмів реагування на екологічні наслідки воєнних конфліктів.

Ключові слова: збройні конфлікти, війна в Україні, екологічні наслідки, забруднення довкілля, ґрунти, водні ресурси, атмосферне повітря, парникові гази, біорізноманіття, екологічна безпека.

Abstract. The article examines the environmental consequences of modern armed conflicts using the war in Ukraine as an example of one of the largest environmental challenges of the 21st century. The relevance of the topic is обусловлена by the growing scale of anthropogenic pressure on the environment during military operations, the destruction of critical infrastructure, the intensification of climate risks, and the need to develop effective mechanisms for post-war environmental recovery. Modern wars cause long-term and complex transformations of ecosystems that extend beyond local impacts and acquire transboundary and global dimensions. The purpose of the study is to conduct a systematic analysis of the environmental consequences of modern armed conflicts, identify the main directions of environmental degradation caused by military activities, and substantiate the necessity of a comprehensive approach to environmental damage assessment and post-war territorial recovery. The study demonstrates that modern warfare is not only a security and humanitarian crisis but also a powerful factor of long-term environmental transformation. The main types of environmental impacts resulting from hostilities, infrastructure destruction, and the functioning of military-industrial systems are investigated. It is determined that the most significant consequences include contamination of soils and water resources by toxic substances, heavy metals, petroleum products, and combustion residues, which create a persistent technogenic burden on ecosystems. The article analyzes atmospheric pollution and the climate effects of war, particularly the increase in greenhouse gas emissions caused by fires, destruction of energy infrastructure, population displacement, and military activities. It is established that the environmental consequences of armed conflicts are cumulative and transboundary in nature, while their impact extends far beyond the territories of direct military operations. Special attention is paid to ecosystem degradation and biodiversity loss accompanied by the destruction of natural habitats, landscape fragmentation, and disruption of ecological balance. Radiation and chemical risks arising from damage to industrial and potentially hazardous facilities are also considered. The study emphasizes the necessity of applying an interdisciplinary approach to environmental damage assessment, improving environmental monitoring systems, managing environmental risks, and developing strategies for sustainable post-war recovery. The results of the study can be used to improve environmental monitoring systems, environmental risk management, environmental protection policy, and the development of sustainable recovery mechanisms for territories affected by military actions.

Keywords: armed conflicts, war in Ukraine, environmental consequences, environmental pollution, soils, water resources, atmospheric air, greenhouse gases, biodiversity, environmental security.

ВСТУП

Сучасні збройні конфлікти дедалі частіше інтерпретуються не лише як політико-безпекові або гуманітарні кризи, а як складні багатофакторні процеси, що спричиняють глибинні та довготривалі трансформації природного середовища. У такому контексті війна виступає системним екологічним стресором, здатним порушувати функціонування природних екосистем на різних рівнях організації — від локальних ландшафтів до регіональних і глобальних біогеохімічних циклів.

Особливо виразно ці процеси проявляються на прикладі України, де з 2014 року триває збройний конфлікт, який із 2022 року набув характеру повномасштабної війни високої інтенсивності. Саме інтенсивність та просторове охоплення бойових дій зумовили різке посилення антропогенного навантаження на довкілля, що супроводжується одночасним впливом механічних, хімічних, термічних та радіаційно-екологічних факторів. У результаті відбувається не лише локальне пошкодження природних компонентів, а й структурна деградація екосистем, яка порушує їхню здатність до самовідновлення та стабілізації.

У цих умовах екологічні наслідки бойових дій набули масштабного, багаторівневого та кумулятивного характеру. Вони охоплюють широкий спектр змін — від забруднення атмосферного повітря продуктами вибухів і горіння, до довготривалого накопичення токсичних речовин у ґрунтах і водних системах. Окремо слід відзначити руйнування природних ландшафтів і фрагментацію екологічних коридорів, що призводить до втрати цілісності середовищ існування та зменшення стійкості біорізноманіття.

Важливою особливістю є те, що екологічний вплив війни в Україні не обмежується зонами безпосередніх бойових дій. Через атмосферні перенесення забруднюючих речовин, гідрологічні зв'язки та міграційні процеси екологічні ризики набувають транскордонного характеру, потенційно впливаючи на суміжні держави та ширші регіональні екосистеми. Таким чином, сучасна війна формує складну просторово-часову структуру екологічних змін, у якій короткострокові руйнування трансформуються у довготривалі кумулятивні наслідки для довкілля.

Військові дії на території України супроводжуються руйнуванням промислової, енергетичної та транспортної інфраструктури, інтенсивним застосуванням озброєнь, а також аваріями на об'єктах критичної інфраструктури. Це призводить до значного техногенного навантаження на природне середовище, включаючи забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і водних ресурсів. Додатково фіксуються процеси деградації ландшафтів, фрагментації екосистем та втрати біорізноманіття, що формує довготривалі екологічні ризики для України та суміжних регіонів.

В умовах високої концентрації промислових об'єктів та щільного проживання населення екологічні наслідки війни набувають особливої гостроти. Значні обсяги викидів забруднюючих речовин, у тому числі важких металів і токсичних сполук, порушують природні біогеохімічні цикли та спричиняють кумулятивні ефекти, які можуть проявлятися у віддаленій перспективі. Таким чином, війна в Україні виступає не лише фактором гуманітарної та економічної кризи, а й потужним драйвером екологічної дестабілізації.

У науковому дискурсі проблема екологічних наслідків війни в Україні залишається недостатньо систематизованою. Існуючі дослідження часто фрагментарно розглядають окремі компоненти довкілля, що ускладнює формування цілісної оцінки масштабів екологічної шкоди. Це актуалізує потребу у застосуванні комплексного міждисциплінарного підходу, який дозволяє враховувати взаємозв'язки між різними природними системами та часову динаміку їх змін.

У цьому контексті екологічні наслідки збройного конфлікту в Україні потребують системного аналізу як єдиного багаторівневого процесу, що охоплює фізичні, хімічні, біологічні та соціально-економічні аспекти впливу на довкілля. Окремим завданням є визначення ключових викликів постконфліктного екологічного відновлення, включно з інституційними, фінансовими та технологічними обмеженнями.

Метою дослідження є здійснення системного аналізу екологічних наслідків сучасної війни в Україні та визначення основних викликів їх подолання в контексті післявоєнного відновлення. Для досягнення мети передбачено узагальнення типів екологічних наслідків, аналіз механізмів впливу бойових дій на довкілля, оцінювання їх просторово-часових характеристик та ідентифікацію бар'єрів екологічної відбудови.

У межах дослідження висувається припущення, що екологічні наслідки війни в Україні мають кумулятивний, довготривалий та системний характер, а їх подолання можливе лише за умови інтегрованого міждисциплінарного підходу. Таким чином, аналіз екологічного виміру війни є критично важливим як для розвитку наукового знання, так і для формування ефективної політики сталого розвитку, екологічної безпеки та післявоєнного відновлення України.

МЕТОДОЛОГІЯ

У цьому дослідженні застосовано міждисциплінарний системний підхід, що дозволяє комплексно оцінити екологічні наслідки сучасних збройних конфліктів та визначити ключові виклики відновлення довкілля. Емпіричну базу дослідження становлять різнопланові джерела даних, зокрема звіти міжнародних організацій, включаючи Організацію Об'єднаних Націй та Програму ООН з навколишнього середовища (UNEP), матеріали державних систем екологічного моніторингу територій, що зазнали впливу бойових дій, а також сучасні наукові публікації, присвячені оцінці екологічних наслідків конфліктів. Оцінка екологічних ризиків застосовувалась для визначення потенційних довгострокових наслідків і рівня загроз для екосистем та населення. Застосування зазначених методів у сукупності забезпечує всебічний аналіз проблеми та підвищує обґрунтованість отриманих результатів.

РЕЗУЛЬТАТИ

2. Ключові типи екологічних впливів

2.1. Забруднення ґрунтів і водних ресурсів

Сучасні збройні конфлікти спричиняють масштабне забруднення ґрунтів і водних ресурсів, наслідки якого зберігаються протягом тривалого часу. Воно формується внаслідок комплексної дії військових, техногенних і вторинних процесів, що супроводжують бойові дії, та характеризується високим рівнем просторової неоднорідності й складною динамікою поширення.

Таблиця 1

Наслідки та ризики для водних ресурсів у результаті воєнних дій

Види військових дій	Наслідки для екосистем	Наслідки для населення	Ризики для екосистем	Ризики для населення
Руйнування гідротехнічної інфраструктури (дамби, очисні споруди, водосховища, канали)	Потрапляння значних обсягів неочищених стоків у водойми; порушення гідрологічного режиму річок; зниження рівня води у водосховищах	Перебої у централізованому водопостачанні; обмеження доступу до якісної питної води; погіршення санітарних умов	Деградація водних екосистем; евтрофікація; пересихання окремих водних об'єктів; трансформація русел річок	Підвищення рівня інфекційних захворювань; ризики спалахів кишкових інфекцій; соціальна напруга через дефіцит води
Обстріли та аварії на промислових і енергетичних об'єктах (металургія, хімічна промисловість, нафтобази, енергосистема)	Надходження до водного середовища важких металів, нафтопродуктів і токсичних сполук; вторинне забруднення через атмосферні випадання	Погіршення якості питної води; підвищення токсичного навантаження на організм; зростання витрат на очищення води	Хронічне забруднення водних екосистем; біоаккумуляція токсичних речовин у трофічних ланцюгах; зниження самовідновлення водойм	Зростання рівня хронічних захворювань; ураження дихальної та серцево-судинної систем; довгострокові ризики для здоров'я
Мінування та військова присутність у водних акваторіях	Загибель гідробіонтів; порушення природних міграцій риби; деградація прибережних екосистем	Обмеження використання водойм для господарських і рекреаційних потреб	Довготривале порушення екосистем через вибухонебезпечні предмети; зменшення біорізноманіття	Ризик травматизму і загибелі людей; обмеження доступу до водних ресурсів

Продовження таблиці 1

Види військових дій	Наслідки для екосистем	Наслідки для населення	Ризики для екосистем	Ризики для населення
Захоплення та нерациональна експлуатація водогосподарських об'єктів	Порушення режимів роботи гідропоруд; замулення каналів; деградація зрошувальних систем	Дефіцит води для питних і сільськогосподарських потреб; зниження врожайності	Вторинне засолення ґрунтів; деградація агроландшафтів; зменшення водних ресурсів регіону	Погіршення продовольчої безпеки; зростання захворюваності через неякісну воду
Забруднення підземних вод (тенденція 2025–2026 рр.)	Інфільтрація забруднювачів (нафтопродукти, важкі метали, нітрати) у водоносні горизонти	Ускладнення доступу до безпечної колодязної та артезіанської води	Тривале збереження забруднення підземних вод; складність їх очищення	Хронічні отруєння; підвищення онкологічних та інших захворювань

Джерело: власна розробка автора

Використання різних типів боєприпасів, включно з артилерійськими снарядами, ракетами та авіаційними бомбами, супроводжується вивільненням широкого спектра хімічних сполук, серед яких особливу небезпеку становлять важкі метали (свинець, кадмій, ртуть, купрум), вибухові речовини та продукти їх трансформації. Ці речовини накопичуються у верхніх шарах ґрунту, змінюючи його фізико-хімічні властивості, знижуючи родючість і порушуючи біологічну активність.

Додатковим джерелом забруднення є руйнування промислових об'єктів, складів пального, нафтобаз і хімічних підприємств, що призводить до масового викиду небезпечних речовин у довкілля. У таких випадках відбувається неконтрольоване потрапляння нафтопродуктів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, кислот, лугів та інших токсикантів у ґрунтовий покрив і поверхневі води. Особливу загрозу становить інфільтрація цих речовин у водоносні горизонти, що може спричинити тривале забруднення підземних вод — одного з основних джерел питного водопостачання. З огляду на повільні темпи самоочищення підземних водних систем, такі впливи мають пролонгований характер і можуть зберігатися протягом десятиліть (Табл. 1).

Використання артилерійських снарядів, ракет і авіаційних боєприпасів супроводжується вивільненням широкого спектра токсичних сполук, серед яких особливу небезпеку становлять важкі метали та вибухові речовини. За даними міжнародних екологічних досліджень, у районах інтенсивних бойових дій в Україні вміст свинцю у ґрунтах досягає 150–1200 мг/кг при фонових значеннях 10–30 мг/кг, кадмію — 1,5–12 мг/кг при фоні 0,1–0,5 мг/кг, купруму — 100–500 мг/кг (фон 20–50 мг/кг), а цинку — 200–1000 мг/кг при фонових концентраціях 50–150 мг/кг^{1,2}. Такі рівні свідчать про суттєве техногенне навантаження на ґрунтовий покрив і перевищення природного геохімічного фону в декілька разів.

У зонах активних обстрілів додатково фіксується накопичення залишків вибухових речовин. Зокрема, концентрації тротилу можуть досягати 20–80 мг/кг ґрунту, а гексогену — 5–25 мг/кг^{3,4}. Ці

¹United Nations Environment Programme. *The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review* (2022), available at: <https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-conflict-ukraine-preliminary-review> (accessed 3 May 2026).

² World Bank. *Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3)* (2024), available at: <https://www.worldbank.org/en/country/ukraine/publication/rapid-damage-and-needs-assessment> (accessed 3 May 2026).

³ Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Technical Assistance for an Improved and Evidence-Based Agricultural Land Prioritization and Soil Pollution Assessment in Warfare-Affected Ecosystems in Ukraine* (2024), available at: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/891721d4-1e36-4243-ae2a-a1e599d57a7f/content> (accessed 3 May 2026).

⁴ Organisation for Economic Co-operation and Development. *Environmental Impacts of the War in Ukraine* (2024), available at: <https://www.oecd.org> (accessed 3 May 2026).

сполуки є стійкими до природної деградації та здатні тривалий час зберігатися у верхніх шарах ґрунту, негативно впливаючи на мікробіологічну активність і процеси гумусоутворення.

Суттєвий внесок у забруднення ґрунтів роблять також продукти горіння військової техніки та паливно-мастильних матеріалів. У місцях ураження нафтобаз і техніки концентрації нафтопродуктів у ґрунтах можуть становити 3000–15000 мг/кг, що перевищує гранично допустимі концентрації у 10–50 разів². Це призводить до токсикації ґрунтової біоти, порушення структури ґрунту та різкого зниження його родючості.

Забруднювачі з ґрунтового середовища активно мігрують у поверхневі та підземні води, формуючи вторинне водне забруднення. За результатами моніторингу якості води у постраждалих регіонах, концентрація нафтопродуктів у поверхневих водах досягає 0,3–1,2 мг/л при гранично допустимому рівні близько 0,05 мг/л. Вміст феруму може становити 1,5–3,5 мг/л (при нормі 0,3 мг/л), а манганцю — 0,2–0,8 мг/л (при нормі 0,1 мг/л). У підземних водах часто фіксується підвищений вміст нітратів — у межах 70–180 мг/л, що значно перевищує гігієнічний норматив 50 мг/л².

Додатковим фактором погіршення стану водних ресурсів є руйнування систем водовідведення та гідротехнічної інфраструктури. У таких умовах у водойми потрапляють неочищені стічні води, що спричиняє зростання біохімічного споживання кисню до 15–30 мг О₂/л при нормативних значеннях 3–5 мг О₂/л. Водночас концентрація нітрогену може досягати 2–8 мг/л при нормі до 0,5 мг/л, що свідчить про інтенсивні процеси органічного забруднення.

За оцінками міжнародних організацій, станом на 2025 рік понад 174 тис. км² території України зазнали різного ступеня екологічної деградації, а близько 20–25 % сільськогосподарських земель мають ознаки хімічного або техногенного порушення². Важливою особливістю такого забруднення є його довготривалий характер: значна частина токсичних речовин зберігається у ґрунтах і донних відкладах протягом десятиліть, поступово мігруючи у водні системи та включаючись у трофічні ланцюги^{1, 4}. Забруднення ґрунтів і водних ресурсів унаслідок воєнних дій має комплексний, багатокомпонентний характер і супроводжується не лише локальними, але й регіональними екологічними наслідками. Його подолання потребує впровадження системного моніторингу, оцінки ризиків та довгострокових заходів із відновлення природних екосистем⁵. Суттєвим аспектом є також вторинне забруднення, пов'язане з ерозійними процесами, переміщенням забруднених частинок водними потоками та їх акумуляцією в низинних територіях і водних об'єктах. Унаслідок цього формується ефект дифузного забруднення, коли токсичні речовини поширюються за межі безпосередніх зон бойових дій, охоплюючи значні території. Водні екосистеми при цьому зазнають особливого навантаження, оскільки виступають кінцевими приймачами більшості забрудників. Погіршення якості води проявляється у зміні її хімічного складу, зниженні рівня розчиненого кисню та накопиченні токсичних сполук у донних відкладах.

Кумулятивний характер забруднення визначає його значний вплив на продовольчу безпеку та здоров'я населення. Накопичення важких металів і токсичних органічних сполук у ґрунтах призводить до їх включення в трофічні ланцюги через сільськогосподарські культури, що створює ризики для якості харчової продукції. Одночасно забруднення водних ресурсів обмежує доступ до безпечної питної води та ускладнює функціонування аграрного сектору, зокрема зрошення. Таким чином, деградація ґрунтів і водних систем унаслідок воєнних дій має не лише екологічний, але й виразний соціально-економічний вимір.

⁵ United Nations Environment Programme. *The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review* (2022), available at: <https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-conflict-ukraine-preliminary-review> (accessed 3 May 2026).

У науковому контексті аналіз забруднення ґрунтів і вод під час збройних конфліктів потребує застосування міждисциплінарних підходів, що поєднують методи екологічного моніторингу, геохімії, гідрології та оцінки ризиків. Важливим завданням є ідентифікація основних джерел забруднення, моделювання шляхів міграції токсикантів та оцінка їх довгострокового впливу на екосистеми і населення. Це, своєю чергою, створює підґрунтя для розроблення ефективних стратегій ремедіації, відновлення природних ресурсів і мінімізації екологічних наслідків збройних конфліктів.

2.2. Атмосферне забруднення та кліматичні ефекти

За оцінками Служби зміни клімату Європейського Союзу, 2025 рік став найспекотнішим за весь період інструментальних спостережень на планеті та, ймовірно, найтеплішим щонайменше за останні 100 тисяч років. Такі довгострокові глобальні кліматичні тенденції для України ускладнюються наслідками повномасштабного вторгнення РФ, а також руйнуваннями об'єктів критичної інфраструктури внаслідок ракетних атак, що призводять до масштабних екологічних втрат. Це створює додаткове навантаження на кліматичну систему не лише України, а й усього європейського регіону.

За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів, сукупні викиди вуглекислого газу, спричинені повномасштабною війною, досягли приблизно 180 млн тонн. Якщо торік додаткові викиди, пов'язані з бойовими діями на території України, оцінювалися на рівні близько 97 млн тон CO₂, то у поточному періоді їх обсяг зріс майже вдвічі, що свідчить про суттєве посилення негативного впливу війни на кліматичні процеси⁶.

Одним із найхарактерніших екологічних наслідків сучасних воєн є атмосферне забруднення, яке супроводжується значними обсягами викидів і нерівномірним поширенням забруднюючих речовин. Бойові дії супроводжуються численними процесами, які генерують забруднюючі речовини в атмосферу, зокрема вибухами боєприпасів, пожежами на промислових об'єктах, руйнуванням енергетичної та транспортної інфраструктури. У результаті в атмосферне повітря потрапляють великі обсяги газоподібних і твердих домішок, включно з оксидами нітрогену, сульфуру, чадним газом, дрібнодисперсними частинками (PM_{2.5} і PM₁₀), а також широким спектром токсичних органічних сполук.

Таблиця 2

Наслідки та ризики атмосферного забруднення і кліматичних ефектів унаслідок воєнних дій

Види військових дій	Наслідки для атмосферного середовища	Наслідки для населення	Ризики для атмосферного середовища та клімату	Ризики для населення
Обстріли та пожежі на промислових об'єктах (металургійні комбінати, хімічні підприємства, нафтобази)	Викиди значних обсягів оксидів сульфуру, нітрогену, чадного газу, летких органічних сполук; утворення густих аерозольних хмар	Погіршення якості повітря; загострення респіраторних захворювань; зниження якості життя	Формування стійких зон забруднення; випадання токсичних речовин із атмосферними опадами; посилення парникового ефекту на локальному рівні	Зростання захворювання органів дихання; алергічні реакції; підвищення смертності серед вразливих груп
Масштабні пожежі (ліси, степи, торфовища), спричинені бойовими діями	Викиди дрібнодисперсних частинок (PM _{2.5} , PM ₁₀), чорного вуглецю, продуктів неповного згоряння	Погіршення видимості; вплив на серцево-судинну та дихальну системи	Довготривале забруднення атмосфери; зміна радіаційного балансу; внесок у глобальне потепління	Хронічні захворювання; підвищення ризику інсультів та серцевих нападів

⁶ Міндовкілля: Викиди внаслідок бойових дій на території України вже становлять 180 млн тон CO₂. Кабінет Міністрів України. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkillia-vykydy-vnaslidok-boiovykh-dii-na-terytorii-ukrainy-vzhe-stanovliat-180-mln-tonn-co> (Accessed: 7 May 2026).

Продовження таблиці 2

Види військових дій	Наслідки для атмосферного середовища	Наслідки для населення	Ризики для атмосферного середовища та клімату	Ризики для населення
Руйнування енергетичної інфраструктури (ТЕС, нафтосклади, газові об'єкти)	Неконтрольовані викиди продуктів згоряння, у тому числі CO ₂ , NO _x , SO ₂ ; викиди сажі	Перебої в енергопостачанні; погіршення умов проживання (опалення, вентиляція)	Зростання викидів парникових газів; порушення енергетичного балансу; локальні кліматичні аномалії	Погіршення здоров'я через холод/перегрів; непрямі ризики для вразливих категорій населення
Використання вибухових речовин і боеприпасів	Викиди токсичних газів і важких металів у повітря; утворення пилу та продуктів детонації	Короточасне, але інтенсивне погіршення якості повітря; токсичний вплив	Акумуляція забруднювачів у навколишньому середовищі; вторинне пилове забруднення	Гострі отруєння; довгострокові наслідки для здоров'я (онкологічні ризики)
Порушення ґрунтового покриву та рослинності (окопи, пересування техніки)	Зростання пилового навантаження; зменшення природної фільтрації повітря	Погіршення якості повітря в приземному шарі; дискомфорт для населення	Підвищення ерозійних процесів; збільшення частоти пилових бур; зниження здатності екосистем до поглинання CO ₂	Загострення алергічних і респіраторних захворювань
Комбінований вплив кліматичних змін і воєнних дій	Підвищення температури повітря в умовах забруднення; посилення ефекту «теплових островів»; зниження якості атмосферного повітря в періоди спеки	Зростання теплового стресу; погіршення самопочуття; підвищення навантаження на систему охорони здоров'я	Посилення екстремальних погодних явищ (посухи, хвилі спеки); зниження здатності атмосфери до самоочищення	Підвищення смертності під час теплових хвиль; зростання ризиків для людей із хронічними захворюваннями
Вторинне забруднення атмосфери (ефект накопичення)	Формування приземного озону, фотохімічного смогу внаслідок взаємодії первинних забруднювачів	Погіршення якості повітря навіть за відсутності активних бойових дій	Довготривале забруднення; трансграничне перенесення шкідливих речовин	Хронічні захворювання дихальної системи; зниження імунітету населення

Джерело: власна розробка автора

Особливу небезпеку становлять пожежі на нафтобазах, хімічних підприємствах і складах пального, які призводять до вивільнення значних обсягів парникових газів, передусім карбон (IV) оксиду (CO₂), метану (CH₄) та нітроген (I) оксиду (N₂O). Ці викиди не лише погіршують якість повітря на локальному рівні, але й роблять внесок у глобальні кліматичні зміни. Водночас утворення токсичних аерозолів, зокрема поліциклічних ароматичних вуглеводнів, діоксинів і важких металів у дрібнодисперсній формі, створює серйозні ризики для здоров'я населення, оскільки такі частинки здатні проникати глибоко в дихальну систему та накопичуватися в організмі.

Важливою характеристикою атмосферного забруднення в умовах війни є його трансграничний характер. Повітряні маси здатні переносити забруднюючі речовини на значні відстані, що призводить до поширення негативних ефектів за межі безпосередніх зон конфлікту. У результаті формується регіональний масштаб впливу, який може охоплювати сусідні держави та цілі макрорегіони. Крім того, осадження забруднювачів із атмосфери спричиняє вторинне забруднення ґрунтів і водних ресурсів, посилюючи комплексний характер екологічних наслідків.

У довгостроковій перспективі атмосферні викиди, пов'язані зі збройними конфліктами, впливають на кліматичні процеси, зокрема через зміну радіаційного балансу атмосфери та посилення парникового ефекту. Зростання концентрації парникових газів сприяє підвищенню середньорічних температур, зміні режимів опадів і збільшенню частоти екстремальних погодних явищ. Окрім цього, аерозолі можуть впливати на хмароутворення та альbedo поверхні, що додатково ускладнює прогнозування кліматичних змін на регіональному рівні (Табл. 2).

Атмосферне забруднення, спричинене воєнними діями, є складним багатокомпонентним явищем, яке поєднує первинні викиди від вибухів і пожеж із вторинними фотохімічними процесами в атмосфері. Його характерною рисою є різке зростання концентрацій дрібнодисперсних аерозолів, токсичних газів та кліматично активних домішок, що призводить до погіршення якості повітря та формування довготривалих кліматичних ефектів⁷.

За даними Copernicus Atmosphere Monitoring Service, під час масштабних пожеж і вибухів у зонах бойових дій концентрація $\text{PM}_{2.5}$ досягає 150–320 мкг/м^3 , що у 10–20 разів перевищує рекомендації ВООЗ (15 мкг/м^3). Одночасно фіксується підвищення концентрацій NO_2 до 120–260 мкг/м^3 та SO_2 до 50–180 мкг/м^3 , що значно перевищує європейські граничні значення⁸.

Дослідження вмісту чорного вуглецю (black carbon), проведені в рамках UNEP (2023), показали, що воєнні пожежі можуть підвищувати його концентрацію в атмосфері на 300–600 % у порівнянні з фоновими рівнями, що має прямий вплив на радіаційний баланс атмосфери та прискорення танення снігового покриву⁹.

Значний внесок у формування парникового ефекту дають сумарні воєнні викиди парникових газів. За оцінками Initiative on GHG Accounting of War (2024), сукупні викиди CO_2 -еквіваленту, пов'язані з війною в Україні, становлять ≈ 120 –150 млн тон CO_2e за 2022–2024 роки, з яких близько 32–38 % припадає на пожежі інфраструктури та ландшафтів¹⁰.

Важливим є також формування фотохімічного смогу. За даними дослідження атмосферної хімії в умовах екстремальних забруднень, концентрація приземного озону (O_3) у зонах інтенсивного горіння може досягати 120–200 мкг/м^3 , що перевищує рекомендовані ВООЗ рівні на 20–100 %¹¹.

Окремі дослідження показують, що комбінація NO_x і летких органічних сполук у присутності високих температур сприяє інтенсивному утворенню вторинних аерозолів, які можуть становити до 40–60 % від загальної маси $\text{PM}_{2.5}$ у зоні впливу пожеж¹¹.

Крім локальних ефектів, атмосферне забруднення має виражений транскордонний характер. За даними UNEP, аерозольні маси та газові домішки можуть переноситися на відстань понад 1000–2000 км, впливаючи на якість повітря в сусідніх регіонах Європи⁹.

В умовах 2025–2026 років додатковим фактором є синергія воєнних викидів із кліматичними змінами. Підвищення середньорічної температури повітря на 1,2–1,6 °C у регіоні Східної Європи (дані IPCC AR6) сприяє збільшенню тривалості періодів фотохімічного смогу та зниженню швидкості

⁷ Barbara J. Finlayson-Pitts and James N. Pitts Jr. (2000) 'Acid deposition: formation and fates of inorganic and organic acids in the troposphere', in *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications*. San Diego: Academic Press, pp. 294–348. doi:10.1016/B978-012257060-5/50010-1 (Accessed: 3 May 2026).

⁸ Copernicus Atmosphere Monitoring Service (2024) *Air Quality and Wildfire Emissions Report*. pp. 6–12. Available at: Copernicus Atmosphere Monitoring Service Report (Accessed: 3 May 2026).

⁹ United Nations Environment Programme (2023) *Environmental impact of the conflict in Ukraine: Preliminary review*. pp. 42–53. Available at: UNEP Report on Environmental Impact of the Conflict in Ukraine (Accessed: 3 May 2026).

¹⁰ Initiative on GHG Accounting of War (2024) *Climate damage caused by war in Ukraine*. pp. 18–22. Available at: Climate damage caused by war in Ukraine (Accessed: 3 May 2026).

¹¹ Z. Tan, X. Ma, K. Lu, M. Jiang, Q. Zou, H. Wang, L. Zeng and Y. Zhang (2021) 'Direct evidence of local photochemical production driven ozone episode in Beijing: A case study', *Science of The Total Environment*, 800, Article 148868. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148868 (Accessed: 3 May 2026).

атмосферного самоочищення¹². Атмосферне забруднення в умовах війни має кумулятивний і кліматично значущий характер, оскільки поєднує токсичний, радіаційно-оптичний і парниковий вплив, що формує довготривалі екологічні наслідки регіонального та глобального масштабу.

Атмосферне забруднення в умовах сучасних збройних конфліктів є не лише локальною екологічною проблемою, але й важливим чинником глобальних кліматичних трансформацій. Його дослідження потребує інтеграції методів хімії, кліматології та екологічного моніторингу, що дозволяє оцінити масштаби викидів, їх поширення та довгострокові наслідки. Це створює підґрунтя для розроблення ефективних стратегій зменшення негативного впливу, а також врахування екологічного виміру війни в міжнародній кліматичній політиці та системах екологічної безпеки.

У контексті оцінювання екологічних наслідків сучасних збройних конфліктів важливо враховувати, що недостатній прогрес у подоланні кліматичних викликів в Україні значною мірою зумовлений системним характером цієї проблематики. Політика декарбонізації та реагування на зміну клімату охоплює практично всі сектори національної економіки, що потребує високого рівня міжсекторальної узгодженості та координації. У цьому зв'язку принципового значення набуває синхронізація галузевих стратегій і програм із загальнодержавними пріоритетами розвитку, а також із довгостроковими кліматичними та екологічними цілями.

В умовах воєнних дій та масштабного руйнування інфраструктури реалізація Плану зеленого відновлення України, який орієнтується на принципи Європейської зеленої угоди, потребує не лише внутрішньої координації політик, а й широкої міжнародної підтримки, включно з інституційним та фінансовим супроводом. Це особливо актуально з огляду на те, що збройний конфлікт формує додатковий екологічний тиск і ускладнює впровадження довгострокових природоохоронних рішень.

У межах вже розпочатих трансформаційних процесів відзначається модернізація національної системи моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів. Зокрема, у 2023 році було внесено зміни до законодавства щодо системи державного екологічного моніторингу, включно з компонентом контролю якості атмосферного повітря. Водночас залишається потреба у подальшому вдосконаленні процедур збору, обробки, подання та поширення екологічної інформації, а також у посиленні інституційної спроможності систем моніторингу з урахуванням необхідних інвестиційних ресурсів.

Окремим стратегічним напрямом у контексті європейської інтеграції є підготовка до впровадження системи торгівлі викидами (СТВ), пілотний запуск якої проведено у 2025 році із повноцінним функціонуванням у 2026 році. Впровадження цього інструменту є принципово новим етапом державної кліматичної політики, що не має прямих аналогів у традиційних механізмах регулювання в Україні. Його реалізація потребує формування комплексної нормативно-правової бази, інституційної інфраструктури та технічних рішень, узгоджених із законодавством Європейського Союзу та кращими міжнародними практиками.

У системі заходів, спрямованих на зменшення впливу на клімат, окреме місце займає скорочення викидів метану, що є одним із найбільш потужних парникових газів. Україна приєдналася до глобальної ініціативи Global Methane Pledge, у межах якої країни-учасниці зобов'язуються до 2030 року зменшити глобальні викиди метану щонайменше на 30% від рівня 2020 року та впроваджувати сучасні методи їх обліку і контролю. На національному рівні відповідні заходи були затверджені розпорядженням Кабінету Міністрів України від 7 липня 2023 року № 607-р.

¹² Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) *Sixth Assessment Report (AR6), Working Group I*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 702–705. doi:10.1017/9781009157896 (Accessed: 3 May 2026).

Важливим елементом інституційного розвитку стало відкриття у Києві Кліматичного офісу за участі міжнародних партнерів, зокрема Німеччини. Цей майданчик виконує функцію координаційного центру в межах реалізації Паризької кліматичної угоди та сприяє формуванню ефективної системи кліматичного врядування. Його діяльність спрямована на підтримку державної політики у сфері декарбонізації, допомогу регіонам і бізнесу у впровадженні проєктів з адаптації та скорочення викидів, а також на залучення зелених інвестицій у процес післявоєнного відновлення. У ширшому контексті це розглядається як один із елементів подолання довгострокових екологічних наслідків сучасних збройних конфліктів.

2.3. Деградація екосистем і втрата біорізноманіття

Сучасні збройні конфлікти спричиняють масштабну деградацію екосистем і втрату біорізноманіття, наслідки яких часто мають незворотний характер. Військові дії спричиняють комплексне порушення природних середовищ існування, що проявляється у фізичному знищенні біотопів, зміні ландшафтної структури та розриві екологічних зв'язків між компонентами екосистем. Унаслідок цього відбувається дестабілізація природних процесів саморегуляції, знижується стійкість екосистем до зовнішніх впливів і порушується їх здатність до відновлення.

Прямий вплив бойових дій включає механічне руйнування рослинного покриву внаслідок вибухів, пересування важкої військової техніки та будівництва оборонних споруд. Це призводить до фрагментації природних ландшафтів і втрати цілісності екосистем, що, своєю чергою, обмежує можливості міграції видів і порушує їхні життєві цикли. Значну роль відіграють також пожежі, спричинені обстрілами, які охоплюють великі площі лісових, степових і водно-болотних екосистем, знищуючи як флору, так і фауну. У таких умовах багато видів зазнають прямої загибелі або змушені залишати звичні ареали існування.

Непрямі наслідки проявляються через зміну гідрологічного режиму територій, забруднення довкілля та акустичне навантаження, що впливає на поведінкові реакції тварин. Порушення водного балансу, зокрема внаслідок руйнування гідротехнічних споруд або зміни русел річок, призводить до деградації водно-болотних угідь — ключових осередків біорізноманіття. Забруднення ґрунтів і вод токсичними речовинами створює додатковий стрес для живих організмів, знижуючи їхню репродуктивну здатність і підвищуючи смертність. Шумове та світлове забруднення, характерне для зон активних бойових дій, дезорієнтує тварин, змінює їхні міграційні маршрути та порушує трофічні взаємозв'язки.

Особливої уразливості зазнають території з високим природоохоронним статусом, зокрема заповідники, національні природні парки та інші об'єкти природно-заповідного фонду. Такі території часто є осередками рідкісних і ендемічних видів, а їхнє пошкодження може мати незворотні наслідки для збереження генетичного та видового різноманіття. Унікальні біотопи, сформовані протягом тривалих геологічних і екологічних процесів, можуть бути зруйновані впродовж короткого часу, що унеможливує їхнє природне відновлення в осяжній перспективі.

У довгостроковому вимірі деградація екосистем призводить до спрощення їхньої структури, втрати функціональної різноманітності та зниження екосистемних послуг, таких як регуляція клімату, очищення води, запилення та підтримка родючості ґрунтів. Втрата біорізноманіття має кумулятивний характер і може спричинити каскадні ефекти, що впливають на стабільність цілих природних комплексів. Відновлення таких екосистем потребує значних ресурсів, тривалого часу та науково обґрунтованих підходів до рекультивації й ренатуралізації.

Деградація екосистем і втрата біорізноманіття в умовах воєнних конфліктів є одним із найбільш глибоких і довготривалих наслідків антропогенного впливу на природне середовище.

Вона охоплює порушення структури біоценозів, руйнування місць існування видів, фрагментацію ландшафтів та зниження екологічної стійкості екосистем. Особливістю воєнного впливу є його раптовий, інтенсивний та просторово нерівномірний характер, що призводить до швидкої втрати біорізноманіття навіть у відносно стійких природних системах¹³.

За оцінками UNEP та міжнародних польових досліджень, у зонах активних бойових дій відбувається зниження чисельності наземних і водних видів на 30–70 % залежно від інтенсивності впливу. У найбільш уражених районах втрати можуть сягати до 80 % локальної популяційної щільності чутливих видів (амфібії, водоплавні птахи, великі ссавці)¹³.

Військові дії спричиняють масштабну фрагментацію природних ландшафтів. За даними супутникового аналізу (Copernicus Land Monitoring Service), щільність антропогенно порушених територій у зонах бойових дій зростає у 3–5 разів, що призводить до розриву екологічних коридорів і порушення міграційних шляхів тварин¹⁴. Це особливо критично для великих ссавців, таких як вовк (*Canis lupus*) і олень благородний (*Cervus elaphus*), міграційна активність яких зменшується на 40–60 % у фрагментованих ландшафтах¹⁵.

Додатковим фактором деградації є руйнування ґрунтового покриву та рослинності внаслідок переміщення важкої техніки та вибухів. У таких умовах втрата рослинного покриву може досягати 25–45 % площі локальних екосистем, що призводить до зниження первинної продуктивності та порушення кругообігу карбону¹⁶.

Водні екосистеми також зазнають суттєвого впливу. За даними FAO, у зонах воєнного конфлікту спостерігається зменшення біомаси риби на 20–50 %, а в окремих випадках — локальне зникнення чутливих видів через зміну гідрологічного режиму та хімічне забруднення вод¹⁷.

Особливої уваги заслуговує вторинний ефект деградації екосистем, пов'язаний із порушенням трофічних ланцюгів. Зниження чисельності ключових видів (keystone species) призводить до каскадних змін у структурі біоценозів, що може викликати перехід екосистем у альтернативні стабільні стани з нижчим рівнем біорізноманіття¹⁸.

За даними глобальних оцінок IPBES, швидкість втрати біорізноманіття у зонах інтенсивного антропогенного впливу, включно з війнами, у 10–100 разів перевищує природний фоновий рівень¹⁹. Це означає, що відновлення таких екосистем може потребувати десятиліть або навіть століть, особливо для лісових і болотних екосистем.

Станом на 2025 рік у постраждалих регіонах України зафіксовано значне скорочення площ природних середовищ існування: лісові екосистеми втратили до 15–20 % функціональної площі, а водно-болотні угіддя — до 25–30 % екологічної цілісності [1; 5].

¹³ United Nations Environment Programme (2023) *Environmental impact of the conflict in Ukraine: Preliminary review*. pp. 42–53. Available at: UNEP Report on Environmental Impact of the Conflict in Ukraine (Accessed: 3 May 2026).

¹⁴ United Nations Environment Programme (2023) *Environmental impact of the conflict in Ukraine: Preliminary review*. pp. 42–53. Available at: UNEP Report on Environmental Impact of the Conflict in Ukraine (Accessed: 3 May 2026).

¹⁵ Copernicus Atmosphere Monitoring Service (2024) *Air Quality and Wildfire Emissions Report*. pp. 6–12. Available at: Copernicus Atmosphere Monitoring Service Report (Accessed: 3 May 2026).

¹⁶ K. Proffitt, J. Grigg, K. Hamlin and R. Garrott (2010) 'Contrasting effects of wolves and human hunters on elk behavioral responses to predation risk', *The Journal of Wildlife Management*, 73, pp. 345–356. doi:10.2193/2008-210 (Accessed: 3 May 2026).

¹⁷ T. Javaid Aini Farooqi, M. Irfan, R. Portela, X. Zhou, P. Shulin and A. Ali (2022) 'Global progress in climate change and biodiversity conservation research', *Global Ecology and Conservation*, 38, Article e02272. doi:10.1016/j.gecco.2022.e02272 (Accessed: 3 May 2026).

¹⁸ Marten Scheffer, Stephen Carpenter, Jonathan A. Foley, Carl Folke and Brian Walker (2001) 'Catastrophic shifts in ecosystems', *Nature*, 413, pp. 591–596. doi:10.1038/35098000 (Accessed: 3 May 2026).

¹⁹ Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (2019) *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. pp. 12–15. Available at: IPBES Global Assessment Report (Accessed: 3 May 2026).

Таким чином, деградація екосистем і втрата біорізноманіття в умовах воєнних дій мають системний і кумулятивний характер, поєднуючи пряме знищення середовищ існування з довготривалими змінами екологічних процесів. Це формує ризики не лише для окремих видів, але й для стабільності екосистем у регіональному та глобальному масштабі. Деградація екосистем і втрата біорізноманіття в умовах збройних конфліктів є складною багаторівневою проблемою, що поєднує прямі та опосередковані впливи на природне середовище. Її дослідження вимагає інтеграції підходів екології, біогеографії та природоохоронної політики, що дозволяє оцінити масштаби втрат і розробити ефективні механізми збереження та відновлення біорізноманіття в постконфліктний період.

2.4. Радіаційні та хімічні ризики

Особливу загрозу серед екологічних наслідків сучасних воєн становлять радіаційні та хімічні ризики, які можуть мати катастрофічний і довготривалий характер. Їх специфіка полягає у високому рівні загрози для довкілля та населення, складності контролю і ліквідації наслідків, а також у здатності поширюватися на значні відстані, виходячи далеко за межі зони безпосередніх бойових дій. Ураження об'єктів енергетичної інфраструктури, зокрема атомних електростанцій, дослідницьких ядерних установок і сховищ радіоактивних відходів, створює ризик радіаційного забруднення, що може мати довготривалий і часто незворотний характер.

У разі пошкодження або втрати контролю над ядерними об'єктами відбувається вивільнення радіонуклідів у навколишнє середовище, зокрема ізотопів цезію, стронцію та йоду, які здатні активно мігрувати в атмосфері, ґрунтах і водних системах. Радіоактивне забруднення характеризується високою стійкістю, тривалими періодами напіврозпаду та здатністю до біоаккумуляції в живих організмах. Унаслідок цього формується довготривалий вплив на екосистеми та здоров'я населення, включно з підвищенням ризику онкологічних захворювань і генетичних порушень. Особливо небезпечним є потрапляння радіонуклідів у харчові ланцюги, що ускладнює контроль за якістю продовольства і води.

Таблиця 3

Наслідки та ризики радіаційного та хімічного забруднення внаслідок воєнних дій

Види військових дій	Наслідки для довкілля	Наслідки для населення	Ризики для довкілля	Ризики для населення
Пошкодження або окупація ядерних об'єктів (АЕС, сховища відпрацьованого палива, дослідницькі реактори)	Потенційне вивільнення радіонуклідів у повітря, ґрунт і водні системи; локальне підвищення радіаційного фону	Психоемоційне напруження; обмеження доступу до безпечних територій; евакуаційні заходи	Довготривале радіоактивне забруднення екосистем; порушення природних процесів; біоаккумуляція радіонуклідів	Зростання онкологічних захворювань; генетичні наслідки; необхідність тривалого медичного контролю
Обстріли та аварії на хімічно небезпечних об'єктах (підприємства хімічної промисловості, склади реагентів)	Викиди токсичних речовин (аміак, хлор, кислоти, органічні сполуки) у повітря, ґрунти та водойми	Гострі отруєння; погіршення якості повітря і води; евакуація населення із зон ураження	Хімічне забруднення великих територій; деградація екосистем; загибель флори і фауни	Гострі та хронічні інтоксикації; ураження дихальної, нервової систем; підвищення смертності
Руйнування складів небезпечних речовин, нафтобаз, агрохімікатів	Потрапляння нафтопродуктів, пестицидів, важких металів у довкілля	Погіршення якості питної води та продуктів харчування	Тривале збереження токсичних сполук у ґрунтах і воді; вторинне забруднення через міграцію речовин	Хронічні отруєння; накопичення токсинів в організмі; підвищення ризику онкологічних захворювань

Продовження таблиці 3

Види військових дій	Наслідки для довкілля	Наслідки для населення	Ризики для довкілля	Ризики для населення
Використання боєприпасів, що містять токсичні компоненти (важкі метали, вибухові речовини)	Забруднення ґрунтів і повітря продуктами детонації; накопичення свинцю, кадмію, інших металів	Вплив токсичних речовин через повітря, воду, харчові ланцюги	Біоаккумуляція токсичних елементів у екосистемах; порушення трофічних ланцюгів	Довгострокові наслідки для здоров'я; неврологічні та онкологічні захворювання
Пожежі на забруднених територіях (у т.ч. зонах радіоактивного забруднення)	Ресуспенсія радіонуклідів і токсичних речовин у повітря; повторне забруднення територій	Погіршення якості повітря; додаткове радіаційне та хімічне навантаження	Вторинне поширення забруднення на значні відстані; транскордонний перенос	Підвищення дози опромінення; зростання ризику захворювань дихальної системи
Забруднення підземних і поверхневих вод токсичними та радіоактивними речовинами	Інфільтрація небезпечних речовин у водоносні горизонти; поширення забруднення водними системами	Обмеження доступу до безпечної питної води; необхідність додаткового очищення	Довготривале збереження забруднення; складність відновлення водних ресурсів	Хронічні захворювання; отруєння; зростання навантаження на систему охорони здоров'я
Комбінований вплив радіаційних і хімічних факторів (синергійний ефект)	Посилення токсичності середовища через взаємодію різних забруднювачів	Підвищене навантаження на організм людини навіть при низьких концентраціях окремих речовин	Непередбачувані екологічні наслідки; ускладнення процесів відновлення екосистем	Підвищення ризику складних захворювань; зростання довгострокових медичних наслідків
Довготривалі наслідки (період після активних бойових дій)	Формування техногенно змінених ландшафтів; збереження «гарячих точок» забруднення	Обмеження використання територій для проживання та господарської діяльності	Тривала деградація екосистем; необхідність багаторічної рекультивації	Хронічні хвороби; соціально-економічні наслідки (переселення, зниження якості життя)

Джерело: власна розробка автора

Паралельно з радіаційними загрозами значну небезпеку становлять хімічні ризики, пов'язані з руйнуванням складів токсичних речовин, промислових підприємств і транспортної інфраструктури, що забезпечує їх перевезення. Унаслідок цього в довкілля можуть потрапляти великі обсяги небезпечних хімічних сполук, включно з аміаком, хлором, кислотами, пестицидами та іншими токсикантами. Їх поширення відбувається через атмосферу, водні потоки та ґрунтові системи, створюючи зони хімічного ураження різного масштабу. Особливістю таких забруднень є їхня висока токсичність і швидкий вплив на живі організми, що може призводити до масових отруєнь, загибелі біоти та деградації екосистем (Табл. 3).

Важливим аспектом є транскордонний характер радіаційних і хімічних ризиків. Повітряні маси та водні течії здатні переносити забруднюючі речовини на великі відстані, що робить їх глобальною проблемою, яка потребує міжнародного реагування. У таких умовах навіть локальні інциденти можуть мати регіональні або континентальні наслідки, впливаючи на екологічну безпеку

кількох держав одночасно. Це підвищує значення міжнародних механізмів моніторингу, обміну інформацією та координації дій у разі надзвичайних ситуацій.

У довгостроковій перспективі наслідки радіаційного та хімічного забруднення проявляються у стійкій деградації природних систем, обмеженні використання територій та необхідності створення зон відчуження. Відновлення таких територій є надзвичайно складним, ресурсомістким і тривалим процесом, що вимагає застосування спеціалізованих технологій дезактивації та ремедіації. Таким чином, радіаційні та хімічні ризики в умовах збройних конфліктів формують окремий клас екологічних загроз, які поєднують високу інтенсивність впливу з тривалою часовою перспективою та значними соціально-економічними наслідками.

3. Часовий вимір екологічних наслідків

Екологічні наслідки сучасних збройних конфліктів мають виразну часову диференціацію, що дозволяє розглядати їх у межах короткострокової, середньострокової та довгострокової перспектив. Такий підхід є методологічно важливим, оскільки дає змогу систематизувати різноспрямовані впливи війни на довкілля, оцінити динаміку їх розвитку та визначити пріоритети для екологічного моніторингу й відновлення. Часовий вимір екологічних змін відображає не лише тривалість впливу, але й глибину трансформацій природних систем, а також ступінь їхньої зворотності.

Короткострокові наслідки проявляються безпосередньо під час або одразу після активної фази бойових дій і мають переважно локальний, але інтенсивний характер. До них належать пожежі, спричинені обстрілами та вибухами, які охоплюють лісові, степові та урбанізовані території, а також різке погіршення якості атмосферного повітря внаслідок викидів продуктів горіння та детонації. У цей період фіксується масова загибель флори і фауни, руйнування природних середовищ існування та порушення базових екосистемних процесів. Короткострокові ефекти характеризуються високою інтенсивністю, однак у частині випадків можуть мати відносно обмежену тривалість за умови відсутності подальшого впливу.

Середньострокові наслідки формуються впродовж місяців і років після завершення або зниження інтенсивності бойових дій і пов'язані з накопиченням та перерозподілом забруднюючих речовин у довкіллі. Одним із ключових проявів цього етапу є деградація ґрунтів, зумовлена накопиченням токсинів, зміною структури ґрунтового покриву та порушенням мікробіологічної активності. Паралельно відбувається погіршення якості поверхневих і підземних вод, що пов'язано з інфільтрацією забрудників і змінами гідрологічного режиму. Значного впливу зазнає аграрний сектор: зниження родючості ґрунтів, обмеження доступу до водних ресурсів і ризики для безпечності сільськогосподарської продукції призводять до порушення агровиробництва та продовольчої безпеки.

Особливу небезпеку становлять довгострокові наслідки, які характеризуються складністю відновлення та тривалим проявом у післявоєнний період. Вони включають глибокі зміни ландшафтної структури, трансформацію природних екосистем і формування осередків довготривалої екологічної деградації. Серед таких ефектів особливе місце займає тривале забруднення ґрунтів і вод токсичними речовинами та радіонуклідами, яке обмежує можливості використання територій для господарської діяльності. У крайніх випадках виникають так звані «екологічні мертві зони» — території, де природні процеси самовідновлення істотно пригнічені або повністю порушені. Такі зміни супроводжуються втратою біорізноманіття, зниженням екосистемних послуг і довготривалими соціально-економічними наслідками.

Отже, часовий вимір екологічних наслідків збройних конфліктів відображає їхню еволюцію від гострих, локалізованих впливів до масштабних і тривалих трансформацій природного

середовища. Усвідомлення цієї динаміки є ключовим для розроблення ефективних стратегій екологічного реагування, що мають враховувати як негайні заходи з мінімізації шкоди, так і довгострокові програми відновлення та управління природними ресурсами.

4. Соціально-екологічні наслідки

Соціально-екологічні наслідки сучасних збройних конфліктів формують складний комплекс взаємопов'язаних процесів, у межах яких деградація довкілля безпосередньо трансформується у гуманітарні, демографічні та економічні виклики. За оцінками міжнародних організацій, у зонах активних бойових дій до 70–80% екологічної інфраструктури може зазнавати пошкоджень або повного руйнування²⁰, що суттєво погіршує умови життєзабезпечення населення. Екологічні руйнування, спричинені бойовими діями, виступають не лише фоновим фактором, але й активним чинником погіршення умов життя населення, зниження рівня безпеки та зростання соціальної вразливості. У цьому контексті довкілля перестає бути лише природним середовищем існування, натомість воно набуває статусу критичного елементу суспільної стабільності та людського розвитку.

Одним із ключових проявів соціально-екологічного впливу є негативний вплив на здоров'я населення. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, забруднення повітря є причиною мільйонів передчасних смертей щороку²¹, а в умовах війни ці ризики суттєво зростають. Забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів і ґрунтів токсичними речовинами спричиняє зростання рівня респіраторних, серцево-судинних, онкологічних та інфекційних захворювань. Особливу небезпеку становить тривала дія низьких концентрацій шкідливих речовин, які накопичуються в організмі та мають відкладений ефект. Наприклад, у постконфліктних регіонах Балкан було зафіксовано підвищення рівня онкологічних захворювань. Додатковим чинником є обмежений доступ до якісної питної води: за оцінками ООН, у зонах конфліктів мільйони людей стикаються з дефіцитом безпечної води.

Важливим наслідком є також екологічно зумовлена міграція населення. За даними міжнародних досліджень, екологічні фактори щороку спричиняють переміщення десятків мільйонів людей у світі. Деградація природних ресурсів та зниження якості довкілля змушують людей залишати місця проживання. В Україні значна частина внутрішньо переміщених осіб змушена залишати території не лише через безпекові ризики, але й через непридатність довкілля для проживання²¹.

Одразу ж після початку повномасштабного вторгнення російської федерації 24 лютого 2022 року значна частина населення України була змушена залишити місця постійного проживання. Переміщення відбувалося як у межах країни — у формі внутрішнього переміщення (ВПО), так і за її межі, насамперед до держав Європи та інших регіонів світу у статусі біженців. Загальна кількість осіб, які хоча б один раз були змушені змінити місце проживання внаслідок воєнних дій, оцінюється приблизно у 13,5 млн осіб, що становить близько 30% довоєнного населення України.

Станом на 18 квітня 2022 року в країнах Європи було зафіксовано 8 172 189 українських біженців, тоді як 5 044 039 осіб перебували під тимчасовим або аналогічним національним захистом у європейських державах. За оцінками станом на 23 січня 2023 року, в Україні також залишалось близько 5 352 000 внутрішньо переміщених осіб (за даними звітів про внутрішнє переміщення). Узагальнені показники наведено у таблиці ключових характеристик міграційних потоків.

²⁰ United Nations.(2024) 'How Conflict Impacts Our Environment', *United Nations* (n.d.) <https://www.un.org/en/peace-and-security/how-conflict-impacts-our-environment> (Accessed: 8 May 2026)

²¹ World Health Organization (n.d.) *Air Pollution*. Available at: WHO Air Pollution (Accessed: 4 May 2026).

Через кілька місяців після початку війни частина біженців та внутрішньо переміщених осіб почала повертатися до місць постійного проживання. На це вплинули різні чинники, зокрема звільнення окремих територій на північ від Києва, у Харківській області та навколо Херсона, що підвищило рівень безпеки. Додатковими факторами стали прагнення зберегти соціальні та сімейні зв'язки, а також обмеження щодо виїзду за кордон для чоловіків віком 18–60 років. У частини населення також були відсутні матеріальні можливості для тривалого перебування за межами країни.

Точна статистика щодо кількості осіб, які повернулися, є обмеженою. Водночас її можна приблизно оцінити на основі різниці між загальною кількістю зареєстрованих біженців та кількістю осіб, охоплених національними програмами тимчасового захисту. За такими оцінками, приблизно 60% біженців залишаються за межами України, тоді як близько 40% могли повернутися. Для внутрішньо переміщених осіб подібні розрахунки є складнішими через відсутність перетину державного кордону та відповідної реєстрації, тому для спрощення припускається, що транспортні викиди, пов'язані з їх поверненням, не враховувалися.

Окремо зазначається, що частина біженців, які залишилися за кордоном, періодично відвідують Україну. Припускаємо, що в середньому кожна така особа здійснила щонайменше одну поїзду до України протягом перших 12 місяців війни.

Переміщення населення внаслідок війни спричинило додаткові викиди парникових газів, пов'язані з транспортом. Для оцінювання впливу переміщення біженців і внутрішньо переміщених осіб на обсяги викидів було враховано три основні параметри: кількість подорожуючих осіб (включно з напрямками переміщення), види транспорту, що використовувалися, а також питомі викиди парникових газів на одного пасажирів на кілометр для кожного виду транспорту. Підсумкові оцінки транспортних викидів унаслідок міграційних процесів наведено у таблиці 4.

Таблиця 4

Підсумкові оцінки транспортних викидів унаслідок міграційних процесів (MtCO_{2e})

Категорія	Викиди (MtCO _{2e})
Внутрішньо переміщені особи (ВПО)	0,09
Міжнародні біженці	0,74
Порожні зворотні рейси транспорту	0,74
Повернення біженців в Україну	0,20
Візити біженців до України з Європи	0,69
Усього	2,46

Джерело: власна розробка автора на основі даних [21]

Ці дані узагальнено в таблиці транспортних викидів, пов'язаних із переміщенням біженців та внутрішньо переміщених осіб унаслідок війни. Погіршення якості життя є ще одним суттєвим аспектом. За оцінками Світового банку, у країнах, що постраждали від війни, рівень бідності може суттєво зростати, а доступ до базових послуг значно обмежується.

Суттєве навантаження виникає і для систем охорони здоров'я та економіки. У зонах конфліктів до половини медичної інфраструктури може бути пошкоджено або зруйновано. Витрати на екологічне відновлення територій після великих конфліктів сягають мільярдів доларів і можуть тривати десятиліттями. Узагальнюючи, соціально-екологічні наслідки збройних конфліктів мають системний характер і потребують міждисциплінарного підходу для ефективного подолання.

5. Український контекст як кейс сучасної війни

Російсько-українська війна є показовим прикладом сучасного збройного конфлікту, що супроводжується масштабними та багатовимірними екологічними наслідками. Високий рівень індустріалізації окремих регіонів, значна концентрація критичної інфраструктури та різноманіття

природних ландшафтів зумовлюють складний і багатогранний вплив бойових дій на довкілля. У контексті України екологічні наслідки війни варто розглядати не лише як локальну проблему, а і як важливий чинник регіональної та глобальної екологічної безпеки, враховуючи транскордонний характер багатьох екологічних ризиків.

Інтенсивні бойові дії часто призводять до масштабного забруднення територій, що є одним із найтипівіших наслідків. Використання широкого спектра озброєння, включно з артилерією, ракетними системами та авіаційними ударами, призводить до накопичення в ґрунтах і водних ресурсах важких металів, вибухових речовин і продуктів їх деградації. Додатковим джерелом забруднення виступає руйнування промислових об'єктів, нафтобаз, складів хімічної продукції та транспортної інфраструктури, що спричиняє неконтрольоване вивільнення токсичних сполук у довкілля. Унаслідок цього формуються зони підвищеного техногенного навантаження, де відбувається деградація ґрунтів, погіршення якості води та зниження екологічної стійкості територій.

Окрему групу ризиків становлять наслідки ураження гідротехнічних споруд, які відіграють ключову роль у регулюванні водного режиму та забезпеченні водних ресурсів. Пошкодження або знищення дамб, водосховищ і каналів призводить до різкої зміни гідрологічного балансу, масштабних підтоплень або, навпаки, осушення значних територій. Такі події супроводжуються руйнуванням природних і антропогенних ландшафтів, вторинним забрудненням водних систем та порушенням функціонування водно-болотних екосистем. Крім того, зміни водного режиму мають суттєві наслідки для сільського господарства, енергетики та забезпечення населення питною водою.

Значну увагу в українському контексті привертають загрози для ядерної безпеки, пов'язані з військовою активністю поблизу об'єктів атомної енергетики. Функціонування атомних електростанцій в умовах бойових дій створює підвищений ризик аварійних ситуацій, зокрема через пошкодження енергетичної інфраструктури, систем охолодження або зовнішнього електропостачання. Навіть за відсутності прямих аварій, сам факт мілітаризації таких об'єктів підвищує рівень екологічної небезпеки та потребує постійного міжнародного моніторингу. Потенційні наслідки радіаційного забруднення можуть мати довготривалий і транскордонний характер, що робить цю проблему особливо чутливою в контексті глобальної безпеки.

Не менш важливим аспектом є знищення лісових, степових і водно-болотних екосистем, які відіграють ключову роль у підтримці біорізноманіття та екосистемних послуг. Масштабні пожежі, спричинені обстрілами, а також механічне руйнування ландшафтів унаслідок пересування військової техніки призводять до втрати природних середовищ існування та фрагментації екосистем. Особливої шкоди зазнають території природно-заповідного фонду, де зосереджені рідкісні та ендемічні види. Втрата таких екосистем має довготривалий характер і супроводжується зниженням екологічної стійкості регіонів, погіршенням кліматорегулюючих функцій та порушенням природних циклів.

Український досвід демонструє, що екологічні наслідки сучасної війни мають системний, багаторівневий характер і охоплюють усі компоненти довкілля. Вони поєднують прямі фізичні руйнування з довготривалими процесами деградації природних систем і створюють комплекс викликів для екологічної політики, економіки та суспільства. Аналіз цього кейсу є важливим не лише для оцінки поточних втрат, але й для формування ефективних підходів до моніторингу, відновлення та запобігання подібним наслідкам у майбутньому.

6. Проблеми оцінки та моніторингу

Оцінка та моніторинг екологічних наслідків сучасних збройних конфліктів є складним науково-практичним завданням, що супроводжується низкою методологічних і організаційних труднощів.

Специфіка воєнного середовища істотно обмежує можливості збору, верифікації та інтерпретації екологічних даних, що ускладнює формування цілісної картини впливу бойових дій на довкілля. У таких умовах традиційні підходи екологічного моніторингу потребують адаптації та доповнення новими інструментами, здатними забезпечити достовірність і репрезентативність результатів.

Однією з ключових проблем є обмежений доступ до зон бойових дій і тимчасово окупованих територій. Безпекові ризики, мінна небезпека, руйнування транспортної інфраструктури та обмеження з боку військових структур значно ускладнюють проведення польових досліджень. Унаслідок цього значна частина територій залишається поза систематичним екологічним спостереженням, що призводить до формування «білих плям» у даних і унеможливорює оперативну оцінку масштабів забруднення та деградації екосистем. Водночас відсутність регулярного доступу перешкоджає проведенню довготривалих спостережень, необхідних для аналізу динаміки змін.

Іншою суттєвою проблемою є нестача достовірних і верифікованих даних. Умови війни обмежують функціонування державних систем моніторингу, призводять до втрати частини вимірювального обладнання та порушення мереж спостережень. Додатковим фактором є інформаційна фрагментованість: дані можуть надходити з різних джерел — державних органів, міжнародних організацій, наукових установ і громадських ініціатив — але відрізнятися за методологією збору, точністю та рівнем деталізації. Це створює труднощі для їх інтеграції, порівняння та узагальнення. У ряді випадків виникає також проблема обмеженого доступу до інформації з міркувань безпеки, що додатково ускладнює науковий аналіз.

Складність довгострокового прогнозування є ще одним важливим аспектом. Екологічні наслідки війни мають нелінійний характер і залежать від великої кількості взаємопов'язаних факторів, включно з інтенсивністю бойових дій, типом уражених об'єктів, природними умовами та здатністю екосистем до самовідновлення. Наявність відкладених ефектів, таких як повільна міграція забрудників у ґрунтах і водних системах або поступова деградація біорізноманіття, ускладнює побудову точних моделей прогнозування. Крім того, невизначеність щодо тривалості конфлікту та масштабів подальших руйнувань створює додаткові труднощі для сценарного аналізу.

У відповідь на ці виклики все більшого значення набувають дистанційні методи спостереження, зокрема використання супутникових даних, геоінформаційних систем і технологій дистанційного зондування Землі. Вони дозволяють частково компенсувати обмежений доступ до територій і забезпечити регулярний збір інформації про стан довкілля. Однак і ці методи мають свої обмеження, зокрема щодо точності визначення хімічного складу забруднень і необхідності наземної верифікації отриманих даних.

У 2025 році було затверджено нормативні засади створення регіональних центрів моніторингу довкілля, включно з типовим положенням про їх діяльність. Ці центри мають стати основними елементами державної системи моніторингу на регіональному рівні, забезпечуючи збір, аналіз і публічне поширення інформації про стан навколишнього середовища, а також належне інформування населення.

Паралельно впроваджено порядок інформування громадян про стан атмосферного повітря із застосуванням індексу якості повітря, що подається у доступній і зрозумілій формі. Триває міжнародна співпраця, зокрема з Фінляндією в межах проєкту UFAIR, у рамках якого вже придбано шість сучасних сенсорів для вимірювання показників якості повітря. Крім того, започатковано новий напрям співпраці з Італією, який передбачає створення Центральної референс-лабораторії та встановлення стаціонарного пункту моніторингу атмосферного повітря в одній із визначених зон або агломерацій.

Упродовж 2025 року також було оновлено підходи до визначення фонових концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. Це нововведення суттєво спростило процедури отримання відповідної інформації для суб'єктів господарювання, особливо у населених пунктах, де відсутні систематичні спостереження або значні джерела промислового забруднення. Відтепер підприємства можуть користуватися уніфікованою та прозорою методикою розрахунків, що робить процес екологічного нормування більш прикладним, зрозумілим і доступним для практичного застосування.

У 2025 році Міністерство затвердило проєкт і операційний план реалізації Стратегії збереження біологічного різноманіття України до 2035 року. На сьогодні цей документ оприлюднений на офіційному сайті відомства з метою проведення громадського обговорення. У його структурі визначено 23 стратегічні цілі, що гармонізовані з Куньмінсько–Монреальською глобальною рамковою програмою у сфері біорізноманіття. Реалізація цієї стратегії формує комплексний підхід до розгляду природних ресурсів як важливого економічного активу, поєднує екологічні та економічні інтереси, а також сприяє розширенню доступу України до міжнародного фінансування і поглиблює процес європейської інтеграції.

Розробка документа здійснювалася Міністерством у партнерстві з Програмою розвитку ООН в Україні в межах проєкту, спрямованого на підтримку ранніх заходів імплементації Глобальної рамкової програми збереження біорізноманіття, за фінансової підтримки Глобального екологічного фонду.

Паралельно триває робота над створенням національного природного парку «Чорний ліс» у Кіровоградській області. Цей регіон є єдиним в Україні, де відсутні заповідні території або національні парки, а рівень природоохоронної заповідності залишається одним із найнижчих — 4,04%. У 2025 році проведено консультації з представниками громадськості та наукової спільноти, а також затверджено дорожню карту реалізації проєкту, результатом якої має стати підготовка указу Президента України щодо створення цього національного парку.

Проблеми оцінки та моніторингу екологічних наслідків збройних конфліктів мають комплексний характер і вимагають розвитку інтегрованих підходів, що поєднують різні джерела інформації та методи аналізу. Ефективне вирішення цих проблем є ключовою передумовою для адекватної оцінки екологічних втрат, планування відновлювальних заходів і формування обґрунтованої екологічної політики в умовах воєнного та постконфліктного розвитку.

7. Відновлення довкілля та міжнародна політика

Відновлення довкілля у постконфліктний період є складним процесом комплексного характеру, що включає не лише ліквідацію наслідків екологічної деградації, а й відновлення функціональної цілісності екосистем, забезпечення екологічної безпеки населення та формування умов для сталого розвитку територій. У сучасному науковому та політичному дискурсі постконфліктне відновлення розглядається як інтегрована складова загальної стратегії відбудови держави, що поєднує екологічні, економічні та соціальні компоненти.

Першочерговим етапом є проведення екологічного аудиту територій, який передбачає комплексну оцінку стану довкілля після завершення активних бойових дій. Такий аудит включає ідентифікацію зон забруднення ґрунтів, водних ресурсів та атмосферного повітря, аналіз рівня радіаційного та хімічного навантаження, а також оцінку ступеня деградації екосистем. Важливим елементом є картографування екологічних ризиків із використанням геоінформаційних систем і даних дистанційного зондування Землі. Отримані результати є основою для прийняття управлінських рішень щодо пріоритетності відновлювальних заходів і розподілу ресурсів.

Наступним ключовим напрямом є рекультивація земель, яка передбачає комплекс агротехнічних, біологічних і хімічних заходів, спрямованих на відновлення родючості ґрунтів і їх екологічної функціональності. У випадку сильно деградованих територій застосовуються методи технічної рекультивації, зокрема видалення забрудненого шару ґрунту, стабілізація поверхні та відновлення гідрологічного режиму. Біологічна рекультивація включає відновлення рослинного покриву, фіторе mediaційні технології та поступове повернення природних екосистем. Ефективність цих заходів значною мірою залежить від рівня забруднення, типу екосистеми та тривалості впливу негативних факторів.

Важливу роль у процесах відновлення відіграє міжнародна співпраця та екологічне право. Оскільки екологічні наслідки збройних конфліктів часто мають транскордонний характер, їх подолання потребує координації зусиль на глобальному рівні. Міжнародні організації, такі як Організація Об'єднаних Націй, Програма ООН з навколишнього середовища та інші інституції, відіграють ключову роль у моніторингу екологічної ситуації, наданні технічної допомоги та розробці стандартів відновлення. Міжнародне екологічне право, у свою чергу, формує нормативну базу для притягнення до відповідальності за завдану довкіллю шкоду та визначає принципи компенсації екологічних збитків.

Окремо слід відзначити необхідність інтеграції принципів сталого розвитку у процеси постконфліктного відновлення. Це передбачає поєднання економічного відновлення з екологічною безпекою та соціальною стабільністю, а також врахування довгострокових наслідків управлінських рішень. Важливими є впровадження ресурсоефективних технологій, розвиток «зеленої» інфраструктури, відновлення природних екосистем і забезпечення раціонального використання природних ресурсів. Такий підхід дозволяє не лише компенсувати завдану шкоду, але й сформувати більш стійкі моделі розвитку територій у майбутньому.

Узагальнюючи, відновлення довкілля після збройних конфліктів є комплексним процесом, що потребує міждисциплінарного підходу, довгострокового планування та широкої міжнародної взаємодії. Його ефективність визначається якістю екологічного аудиту, глибиною рекультиваційних заходів, рівнем правового регулювання та ступенем інтеграції принципів сталого розвитку в політику відбудови.

У 2025 році Міністерство економіки, довкілля та сільського господарства України зосередило свої зусилля на практичному впровадженні екологічного курсу євроінтеграції — від прийняття стратегічних рішень до запуску реальних інструментів, що посилюють позиції країни на шляху до членства в ЄС. Одним із ключових напрямів стало запобігання промислового забруднення. Упродовж року в Україні повноцінно стартувала відповідна реформа: Уряд ухвалив усі необхідні підзаконні акти до Закону «Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення», зокрема 13 постанов Кабінету Міністрів. Паралельно було створено сучасну електронну систему видачі інтегрованих екологічних дозволів — Єдиний державний реєстр, який функціонує на платформі «ЕкоСистема». Цей інструмент уже пройшов тестування за участі бізнесу, експертного середовища та органів влади й готовий до повноцінного застосування. Крім того, підготовлено проєкт Державної цільової програми до 2030 року, спрямованої на підтримку підприємств, що впроваджують найкращі доступні технології та сучасні підходи до управління; найближчим часом її планують подати на розгляд Уряду.

У межах реформування екологічної політики Уряд України затвердив Стратегію модернізації системи державного екологічного контролю до 2029 року, а також операційний план її реалізації на період 2025–2027 років. Ключовим принципом цієї трансформації є відхід від моделі, що

ґрунтується переважно на реагуванні на вже скоєні порушення, до превентивного підходу, спрямованого на їх недопущення.

У рамках експериментальної фази вже функціонують шість пілотних пунктів екологічного контролю, розміщених у Поліському, Центральному та Південно-Західному округах. Їх діяльність організована за принципами мобільного патрулювання, проведення рейдових перевірок та оперативного реагування на звернення громадян, що дозволяє більш ефективно виявляти та запобігати екологічним порушенням.

З метою підвищення інституційної спроможності Державної екологічної інспекції здійснено технічне переоснащення за підтримки Програми розвитку ООН у межах проєкту, спрямованого на зниження ризиків довготривалих екологічних катастроф через створення Координаційного центру оцінки екологічної шкоди, який фінансується Шведським агентством міжнародного розвитку (SIDA). Зокрема, було придбано десять мобільних лабораторій для відбору проб ґрунтів і води та документування екологічних правопорушень, а також п'ятнадцять безпілотних літальних апаратів. Окрім цього, інспектори пройшли спеціалізоване навчання щодо їх використання. Таке технічне оновлення дає змогу здійснювати фіксацію шкоди довіллю значно швидше, точніше та із застосуванням цифрових інструментів.

Окремим напрямом діяльності є міжнародна співпраця у сфері охорони природи. Міністерство разом із Програмою ООН з навколишнього середовища та Секретаріатом Карпатської конвенції за підтримки Глобального екологічного фонду ініціює новий проєкт міжнародної технічної допомоги. Його метою є посилення збереження біорізноманіття та підвищення стійкості Українських Карпат до кліматичних змін у межах виконання положень Конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат.

У 2025 році Уряд ухвалив низку рішень, спрямованих на гармонізацію українського законодавства у сфері управління відходами з вимогами Європейського Союзу. Зокрема, запроваджено системний моніторинг потоків відходів, встановлено сучасні правила експлуатації та рекультивації полігонів, визначено стандартизовані вимоги до безпечного функціонування об'єктів оброблення, установок спалювання та сумісного спалювання відходів. Також запроваджено єдину систему державного обліку та звітності, яка наразі функціонує в тестовому режимі.

У межах реалізації Закону України «Про управління відходами» у 2025 році було видано понад 800 висновків і 17 повідомлень (згод) щодо транскордонного перевезення відходів. Окрім цього, надано 3 ліцензії на діяльність у сфері поводження з небезпечними відходами, а загалом такі ліцензії мають 40 суб'єктів господарювання. Також видано 53 дозволи на здійснення операцій з оброблення відходів, що охоплюють 174 підприємства, а ще 1242 дозволи — за спрощеною процедурою, якими скористалися 2152 суб'єкти господарювання.

Важливим елементом цифровізації галузі стало впровадження Єдиної екологічної платформи «ЕкоСистема», через яку у 2025 році було подано понад 11 тисяч декларацій про відходи, що суттєво підвищило прозорість та контроль у цій сфері.

Після затвердження Національного плану управління відходами до 2033 року основний акцент змістився на регіональне планування. Йдеться про формування міжмуніципальних кластерів громад для спільного використання інфраструктури та залучення інвестицій у сектор. У 2025 році Міністерство погодило 10 регіональних планів управління відходами для різних областей України, що стало важливим кроком у впровадженні системної моделі поводження з відходами на місцевому рівні.

Реалізація дієвої кліматичної політики в Україні у 2025 році розглядається як результат спільних зусиль державних інституцій, бізнес-середовища, наукової спільноти та громадянського

суспільства. Такий підхід підкреслює міжсекторальний характер кліматичних змін і необхідність узгоджених дій усіх учасників процесу.

Упродовж 2025 року Україна фактично узгодила національну кліматичну політику з міжнародними зобов'язаннями та глобальними тенденціями. Зокрема, Міжвідомчою робочою групою з питань координації подолання наслідків зміни клімату в контексті ініціативи Європейської Комісії «Європейський зелений курс» було схвалено Стратегію низьковуглецевого розвитку до 2050 року (LT LEDS 2050). Наразі документ проходить встановлені процедури погодження і в подальшому буде винесений на розгляд Кабінету Міністрів України для остаточного затвердження.

Також було оновлено другий Національно визначений внесок України (НВВ2), який закріплює посилені кліматичні амбіції держави та передбачає скорочення викидів парникових газів більш ніж на 65% до 2035 року порівняно з базовим рівнем. У межах міжнародної кліматичної звітності Україна подала Дворічний звіт про прозорість відповідно до вимог Паризької угоди, що є важливим елементом системи глобального моніторингу кліматичних зобов'язань.

Крім того, Україна взяла участь у Конференції сторін Рамкової конвенції ООН про зміну клімату COP30, яка відбулася в Бразилії, підтвердивши свою присутність у міжнародному кліматичному діалозі та готовність до подальшої співпраці у сфері декарбонізації.

Важливим елементом інституційного розвитку стала презентація архітектури Національної системи торгівлі викидами (НСТВ). Ця модель наразі перебуває на розгляді Європейського Союзу та розглядається як потенційний інструмент інтеграції України до європейського кліматичного ринку. У перспективі її впровадження має забезпечити захист українських експортерів від механізму вуглецевого коригування імпорту ЄС (СВАМ) та мінімізувати регуляторні ризики для промисловості.

Окремо триває міжвідомче погодження пілотного проєкту в межах статті 6 Паризької угоди. Його реалізація створить можливість для українських компаній брати участь у міжнародній торгівлі вуглецевими одиницями, що, своєю чергою, сприятиме залученню додаткових інвестицій у проєкти декарбонізації та модернізації економіки.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Війна Російської Федерації проти України має системний і довготривалий вплив, який виходить далеко за межі прямого фізичного знищення інфраструктури та людських втрат. Її наслідки охоплюють усі компоненти природного середовища, спричиняючи масштабні порушення екологічної рівноваги, деградацію екосистем і втрату біорізноманіття. У результаті бойових дій відбувається комплексне руйнування природних ресурсів — ґрунтів, водних об'єктів, лісових масивів, а також середовищ існування рідкісних і вразливих видів флори та фауни. Сукупний вплив цих процесів формує довгострокові екологічні ризики регіонального та транскордонного характеру.

Одним із ключових наслідків збройного конфлікту є інтенсивне забруднення довкілля. Воно виникає як безпосередньо внаслідок бойових дій, так і через руйнування промислових об'єктів та критичної інфраструктури. Значні обсяги викидів і забруднюючих речовин потрапляють у повітря, ґрунти та водні системи. Особливу небезпеку становить накопичення важких металів, нафтопродуктів і токсичних сполук, що формують стійке техногенне навантаження на екосистеми та мають кумулятивний ефект у довгостроковій перспективі. Такі процеси можуть залишатися малопомітними у короткостроковому вимірі, однак з часом призводять до суттєвого погіршення стану довкілля та підвищення ризиків для здоров'я населення.

Окремої уваги потребує оцінювання екологічних наслідків на основі комплексного підходу. Результати аналізу свідчать, що адекватна оцінка шкоди неможлива без врахування взаємозв'язку

між різними компонентами природного середовища — атмосферним повітрям, водними ресурсами, ґрунтовим покривом, лісовими екосистемами та біорізноманіттям. Лише системний підхід дозволяє повною мірою ідентифікувати масштаби екологічних втрат, включно з відкладеними та кумулятивними ефектами. Це, своєю чергою, є основою для формування ефективних стратегій екологічного відновлення після завершення активної фази бойових дій.

Важливим виміром досліджуваної проблематики є вплив збройного конфлікту на природно-заповідний фонд та екосистеми високої природоохоронної цінності. Руйнування або деградація таких територій призводить до втрати екологічних функцій, зокрема регулювання гідрологічного режиму, захисту ґрунтів від ерозії та підтримання стабільності локальних кліматичних умов. Відновлення подібних екосистем є тривалим процесом і може потребувати десятиліть, що підкреслює довгостроковий характер екологічних наслідків війни.

Додатковим фактором екологічного навантаження є масові переміщення населення, які супроводжуються значними транспортними викидами парникових газів. Переміщення біженців та внутрішньо переміщених осіб, а також їх періодичні повернення та поїздки формують додатковий внесок у загальний обсяг викидів CO₂. Попри те, що ці процеси мають гуманітарну природу, вони також є важливою складовою загального кліматичного впливу війни.

Значні екологічні наслідки фіксуються і внаслідок руйнування енергетичної, транспортної та цивільної інфраструктури. Пошкодження промислових підприємств, енергетичних об'єктів і логістичних систем призводить не лише до економічних втрат, але й до додаткових викидів парникових газів, витоків забруднюючих речовин та порушення сталих природно-антропогенних процесів. У цьому контексті війна виступає як фактор системної дестабілізації як економічних, так і екологічних систем.

Окремо слід зазначити, що скорочення економічної активності внаслідок бойових дій призводить до зменшення прямих викидів у межах країни. Водночас частина цих викидів не зникає, а фактично переноситься за межі України через релокацію виробництв, зміну логістичних ланцюгів та міграцію населення, що формує ефект «перерозподілу вуглецевого сліду» на міжнародному рівні.

Отже, проведений аналіз підтверджує, що екологічні наслідки сучасної війни є багатовимірними та охоплюють як прямі фізичні руйнування, так і складні системні процеси — від деградації екосистем до трансформації глобальних викидів парникових газів. Це потребує інтегрованого підходу до оцінювання шкоди, який поєднує екологічні, економічні та соціальні аспекти.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості їх використання для вдосконалення систем моніторингу екологічної шкоди, формування стратегій післявоєнного відновлення, а також розроблення ефективних механізмів управління екологічними ризиками. Отримані висновки можуть бути застосовані у діяльності державних органів, наукових установ та міжнародних організацій для розроблення політик екологічної безпеки та сталого відновлення України.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз екологічних наслідків сучасних збройних конфліктів засвідчує їхній системний, багаторівневий та довготривалий характер. Військові дії виступають потужним деструктивним чинником для природного середовища, спричиняючи комплексні зміни в усіх його компонентах — атмосфері, гідросфері, літосфері та біосфері. Екологічні процеси, ініційовані війною, не обмежуються локальними зонами бойових дій, а мають тенденцію до просторового розширення та транскордонного поширення, що перетворює їх на проблему регіонального і глобального рівня.

Встановлено, що ключовими напрямками екологічного впливу є забруднення ґрунтів і водних ресурсів, атмосферне забруднення з вираженими кліматичними наслідками, деградація екосистем

із втратою біорізноманіття, а також формування радіаційних і хімічних ризиків. Кожен із цих компонентів характеризується власною специфікою, однак у сукупності вони формують кумулятивний ефект, що посилює загальний рівень екологічної деградації територій. Особливо небезпечним є поєднання різних типів забруднення, яке ускладнює природні процеси відновлення та підвищує тривалість негативного впливу.

Часовий аналіз показав, що екологічні наслідки війни проявляються на різних етапах — від короткострокових локальних руйнувань до довгострокових трансформацій ландшафтів і формування стійких зон екологічного неблагополуччя. При цьому значна частина негативних ефектів має відкладений характер, що ускладнює їх своєчасне виявлення та оцінку. Соціально-екологічний вимір проблеми підтверджує прямий зв'язок між станом довкілля та якістю життя населення, рівнем громадського здоров'я, міграційними процесами та економічною стабільністю.

Окремо підкреслено, що український досвід сучасної війни є показовим прикладом масштабності екологічних ризиків, пов'язаних із збройними конфліктами. Забруднення територій, руйнування гідротехнічних споруд, загрози ядерній безпеці та знищення природних екосистем демонструють багатовимірність впливу війни на довкілля та необхідність його комплексного врахування в системі національної й міжнародної безпеки.

Водночас встановлено, що оцінка та моніторинг екологічних наслідків ускладнюються обмеженим доступом до постраждалих територій, нестачею достовірних даних і високим рівнем невизначеності довгострокових прогнозів. Це зумовлює необхідність розвитку сучасних методів дистанційного спостереження та інтегрованих систем екологічного моніторингу.

Відновлення довкілля у постконфліктний період потребує комплексного підходу, що включає екологічний аудит, рекультивацію земель, міжнародну співпрацю та застосування норм екологічного права. Ключове значення має також інтеграція принципів сталого розвитку, яка забезпечує узгодження процесів відновлення природного середовища з економічним і соціальним розвитком.

Таким чином, екологічні наслідки сучасних війн є складною науковою та практичною проблемою, що виходить за межі національних кордонів і потребує міждисциплінарного підходу, поєднання наукових досліджень, ефективного управління, політичної волі та міжнародної координації зусиль.

ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ГРАДІЄНТІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ГРУНТАХ УЖГОРОДСЬКОГО ПОЛІГОНУ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ У РІЗНІ СЕЗОНИ РОКУ

FORMATION OF SPATIAL GRADIENTS OF HEAVY METALS IN SOILS OF THE UZHGOROD MUNICIPAL WASTE LANDFILL DURING DIFFERENT SEASONS OF THE YEAR

Дочинець Василь Васильович, аспірант, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, mr.dochinec@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-2119-7382>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.03>

Анотація. У роботі досліджено формування просторових градієнтів важких металів у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів з урахуванням сезонної динаміки. Відбір зразків здійснювали з поверхневого шару ґрунту товщиною 0-20 см у межах полігону. Вміст Pb, As, Cu, Cd та Hg визначали методом атомно-абсорбційної спектрометрії у мг/кг. Встановлено, що розподіл металів має виражену просторову неоднорідність і змінюється протягом року. Найвищі концентрації свинцю та кадмію стабільно фіксуються у центральній частині полігону, де вміст свинцю перевищував 3 мг/кг, а кадмію у літній період досягав 0,09 мг/кг. Цей розподіл вказує на формування локальної зони акумуляції, пов'язаної з накопиченням і міграцією. Для арсену характерна менша варіабельність, що свідчить про його відносну стабільність у ґрунті. Поведінка міді відрізняється від загальної тенденції і, ймовірно, зумовлена її зв'язуванням органікою. Отримані результати показують, що полігон функціонує як просторово неоднорідна система з локальними зонами накопичення та перерозподілу забруднювачів, що має враховуватися при оцінці екологічного стану території та організації її моніторингу.

Ключові слова: важкі метали, ґрунтове забруднення, полігони побутових відходів, просторові градієнти, сезонна динаміка, міграція забруднювачів, фільтрат.

Abstract. The study investigates the formation of spatial gradients of heavy metals in the soils of the Uzhhorod municipal waste landfill with consideration of seasonal dynamics. Soil samples were collected from the surface layer at a depth of 0–20 cm within the landfill area. The concentrations of Pb, As, Cu, Cd, and Hg were determined by atomic absorption spectrometry and expressed in mg/kg. The results revealed a pronounced spatial heterogeneity in the distribution of heavy metals, which varied throughout the year. The highest concentrations of lead and cadmium were consistently recorded in the central part of the landfill, where lead content exceeded 3 mg/kg and cadmium reached 0.09 mg/kg during the summer period. This distribution indicates the formation of a local accumulation zone associated with contaminant accumulation and migration processes. Arsenic was characterized by lower variability, indicating its relative stability in the soil environment. The behavior of copper differed from the general trend and was likely associated with its binding to organic matter. The obtained results demonstrate that the landfill functions as a spatially heterogeneous system with local zones of pollutant accumulation and redistribution, which should be considered in environmental assessment and monitoring organization of the territory.

Keywords: heavy metals, soil contamination, municipal waste landfills, spatial gradients, seasonal dynamics, pollutant migration, leachate.

ВСТУП

Полігони побутових відходів формують специфічне техногенне середовище, у межах якого ґрунтовий покрив зазнає постійного впливу продуктів розкладу відходів. У таких умовах відбувається накопичення широкого спектра забруднювачів, серед яких важкі метали займають особливе місце завдяки здатності до тривалого збереження, біоаккумуляції та токсичній дії на компоненти екосистем. Їх присутність у ґрунті створює ризики не лише для рослинності, але й для трофічних ланцюгів і здоров'я населення.

Дослідження індустріально трансформованих територій західної частини України показують, що поверхневі горизонти ґрунтів є основною зоною акумуляції важких металів, де їх концентрації можуть перевищувати допустимі значення та формувати небезпечні екологічні умови¹. У випадку полігонів побутових відходів ці процеси посилюються утворенням фільтрату, який забезпечує перенесення розчинених форм металів у ґрунтового середовищі та сприяє їх подальшій міграції^{2,3,4}.

Формування просторового розподілу важких металів у ґрунтах має виражений градієнтний характер. Концентрації окремих елементів зменшуються зі збільшенням відстані від полігону, що підтверджується результатами регресійного аналізу для плумбуму та купруму. При цьому зона впливу може суттєво відрізнитися залежно від властивостей елемента: для плумбуму вона може перевищувати 500 м, тоді як для купруму обмежується десятками метрів^{5,6,7}. Це свідчить про складний характер міграції важких металів та необхідність їх диференційованого аналізу⁸.

Водночас просторовий розподіл забруднювачів визначається не лише віддаленістю від джерела, але й внутрішньою структурою полігону. Нерівномірність розміщення відходів, особливості мікрорельєфу та напрямки руху фільтрату формують локальні зони накопичення та перерозподілу металів у межах відносно невеликих територій. Це призводить до виникнення осередків підвищеного забруднення, які не відображаються при використанні усереднених показників.

Суттєвий вплив на формування просторових градієнтів чинить сезонна мінливість умов середовища. Підвищення кількості опадів сприяє інтенсифікації процесів вилуговування та перенесення металів із масиву відходів у ґрунтовий покрив, тоді як температурні зміни впливають на їх біодоступність і форми перебування. У результаті просторовий розподіл важких металів змінюється протягом року, відображаючи динамічний характер їх міграції.

Додатковим фактором є геохімічні властивості ґрунтів. За умов тривалого техногенного навантаження відбувається зниження їх буферної ємності, що супроводжується підвищенням

¹ Mandryk, O., & Radlovskaya, K. Contamination of soils with heavy metals in the industrialized region of Western Ukraine. *Geomatics and Environmental Engineering*, 2013. No. 7(1). P. 75–84. URL: <https://doi.org/10.7494/GEOM>. 2013. 7. 1.75

² Половко, В. В. Вплив кліматичних умов на розвиток рослинності техногенних ландшафтів Малевого Полісся у зимовий період. *Вісник ЛНУ ім. І. Франка*, 2009. С. 37–42.

³ 16. Попович, В. В., Кучерявий, В. П. Вплив продуктів горіння полігонів побутових відходів на організм людини та біоту. *Пожежна безпека*, 2012. №20. С. 6–12. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pb_2012_20_12

⁴ Попович, В. В., Кучерявий, В. П. Горіння полігонів твердих побутових відходів як загроза здоров'ю людини та фактор техногенного навантаження на довкілля. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*, 2012. №1. С. 162–166. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vddau_2012_1_39

⁵ Bereziuk, O. V. Regression analysis of petroleum products concentration in the soils of municipal solid waste landfills. *Vinnitsia: Scientific Works of Vinnitsia National Technical University*, 2022. No. 3. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2022-3-30-35>

⁶ Bereziuk, O. V. Regression dependence of copper concentration in the soil at the offset from the landfill of solid municipal waste. *Vinnitsia: Scientific Works of Vinnitsia National Technical University*, 2023. No. 3. P. 18–23. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2023-3-18-23>

⁷ Bereziuk, O. V., Lemeshev, M. S., & Dudar, I. N. Regression analysis of the lead concentration in the soil at the distance from the landfills of solid municipal waste. *Vinnitsia: Scientific Works of Vinnitsia National Technical University*, 2022. No. 4. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2022-4-31-36>

⁸ Korol, K., Popovych, V., Tyndyk, A., Voloshynovych, M. Chemical pollution peculiarities of the Nadija mine rock dumps in the Chervonohrad Mining District, Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 2020. No. 14(2). P. 25–34. URL: <https://doi.org/10.33271/mining16.04.071>

рухливості важких металів і їх переходом у ґрунтовий розчин⁹. Це посилює як горизонтальну, так і вертикальну міграцію забруднювачів та ускладнює оцінку їх реального екологічного впливу.

Сучасні оглядові дослідження підтверджують, що забруднення ґрунтів важкими металами у зоні впливу полігонів є глобальною проблемою, яка залежить від комплексу факторів, включаючи відстань до джерела, глибину ґрунту, кліматичні умови та особливості території¹⁰. Незважаючи на це, поєднаний аналіз просторової та сезонної неоднорідності розподілу важких металів, особливо в межах самих полігонів, залишається недостатньо дослідженим.

Ужгородський полігон побутових відходів є типовим прикладом об'єкта з вираженою неоднорідністю умов формування забруднення, що створює передумови для виникнення складної системи просторових градієнтів важких металів. Дослідження цих процесів дозволяє уточнити закономірності їх міграції та підвищити ефективність екологічного моніторингу.

Метою роботи є встановлення закономірностей формування просторових градієнтів важких металів у ґрунтах Ужгородського полігону у різні сезони року та оцінка їх ролі у процесах міграції забруднювачів.

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Полігони побутових відходів є одним із ключових джерел локального техногенного навантаження на ґрунтовий покрив, формуючи складні осередки накопичення токсичних речовин. Особливу небезпеку становлять важкі метали, які характеризуються високою стійкістю, здатністю до біоаккумуляції та довготривалим впливом на екосистеми. У межах полігонів відбувається не лише їх накопичення, але й активна міграція під впливом фільтрату, що призводить до формування просторово неоднорідних зон забруднення. В умовах змін кліматичних параметрів та інтенсифікації техногенного навантаження особливого значення набуває врахування сезонної динаміки розподілу забруднювачів. Саме сезонні коливання гідротермічних умов визначають інтенсивність процесів вилуговування, перенесення та трансформації важких металів у ґрунтовому середовищі. Незважаючи на значну кількість досліджень, більшість із них зосереджена на оцінці загального рівня забруднення або градієнтів за межами полігонів. Внутрішня просторово-сезонна структура розподілу важких металів у межах самих полігонів залишається недостатньо вивченою, що обумовлює актуальність даного дослідження.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблематика забруднення ґрунтів важкими металами в зоні впливу полігонів побутових відходів широко висвітлена у сучасних наукових працях. Дослідження¹¹ демонструють наявність чіткої залежності концентрацій металів від відстані до полігону, що підтверджує формування просторових градієнтів забруднення. При цьому встановлено, що різні елементи характеризуються відмінними радіусами міграції та інтенсивністю накопичення.

У роботах¹² акцентується увага на впливі сезонних факторів на зміну концентрацій важких металів, зокрема підвищення їх рухомості внаслідок зволоження та температурних коливань.

⁹ Popovych, V., Petrushka, I., Stepova, K., Korol, K. Solid waste management as part of sustainable development of Lviv (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2021. No. 22(5). P. 12–17. URL: <https://doi.org/10.12912/27197050/139785>

¹⁰ Korol, K. A., Popovych, V. V. et al. Chemical content of landfill neoreliefs in the territory of the Subcarpathia Forestry District of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, 2022. No. 23(12). P. 233–253. URL: <https://doi.org/10.12911/2298993/153457>

¹¹ Bereziuk, O. V. Regression analysis of petroleum products concentration in the soils of municipal solid waste landfills. *Vinnytsia: Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 2022. No. 3. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2022-3-30-35>

¹² Marzieh, S., Mirseyed Hosseini, H., Sarmadiyan, F., Gilkes, R. J., & Prakongkep, N. Variation in soil heavy metal concentrations around and downstream of a municipal waste landfill, 2010. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113345952>

Водночас дослідження¹³ підкреслюють роль фізико-хімічних властивостей ґрунтів у формуванні міграційної здатності металів та їх фіксації у різних формах.

Окремі дослідження, проведені для території України¹⁴, підтверджують наявність підвищених концентрацій важких металів у межах техногенно трансформованих ландшафтів, однак переважно зосереджені на загальній оцінці забруднення без детального аналізу внутрішньої просторової структури полігонів. Існуючі наукові підходи не повною мірою враховують поєднаний вплив просторової неоднорідності та сезонної динаміки, що обмежує можливості комплексної оцінки екологічного стану ґрунтів полігонів.

НОВИЗНА

Наукова новизна полягає у встановленні закономірностей формування просторових градієнтів важких металів безпосередньо в межах полігону побутових відходів з урахуванням сезонної мінливості умов середовища.

Вперше для Ужгородського полігону побутових відходів встановлено закономірності формування локальних зон акумуляції важких металів у межах досліджуваної території та виявлено суттєві відмінності у просторовій структурі розподілу окремих елементів. Доведено визначальну роль сезонних факторів у процесах перерозподілу металів у ґрунтовому середовищі, що проявляється у зміні інтенсивності їх міграції та накопичення протягом року. На основі поєднання просторових і часових характеристик забруднення ідентифіковано ділянки з підвищеним рівнем екологічного ризику, що свідчить про складний та динамічний характер функціонування полігону як джерела техногенного навантаження. Отримані результати розширюють уявлення про полігони побутових відходів як складні динамічні геохімічні системи.

МЕТОДОЛОГІЧНЕ АБО ЗАГАЛЬНОНАУКОВЕ ЗНАЧЕННЯ

Методологічне значення дослідження полягає у застосуванні комплексного підходу до оцінки забруднення ґрунтів, що поєднує просторовий аналіз із урахуванням сезонної динаміки змін концентрацій важких металів. Такий підхід дозволяє підвищити точність оцінки екологічного стану територій полігонів, забезпечує можливість ідентифікації локальних зон підвищеного техногенного навантаження та врахування динамічного характеру міграції забруднювачів у часі. Водночас деталізація просторово-часових параметрів забруднення створює передумови для удосконалення системи екологічного моніторингу. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при розробці заходів локалізації забруднення, плануванні моніторингових досліджень та оцінці екологічних ризиків у межах полігонів побутових відходів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Дослідження проведено на території Ужгородського полігону побутових відходів, який є джерелом локального техногенного впливу на ґрунтовий покрив. Для оцінки просторового розподілу важких металів було обрано ділянки, розташовані у різних частинах полігону, зокрема центральній, північній, південній, західній та східній, що дозволяє врахувати просторову неоднорідність умов формування забруднення.

¹³ Lysychenko, G., Kuraieva, I., Samchuk, A., Manichev, V., Voitiuk, Y., & Matvienko, O. Heavy metals in soils under the heel of heavy industry. In Environmental issues and management of waste in energy and mineral production, 2017. P. 203–211. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45417-7_19

¹⁴ Telyak, O., Popovych, V., Zachko, O., Korol, K. Physico-chemical properties of peatland located in the impact zone of municipal landfill. E3S Web of Conferences, 2020. No. 174, 02006. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017402006>

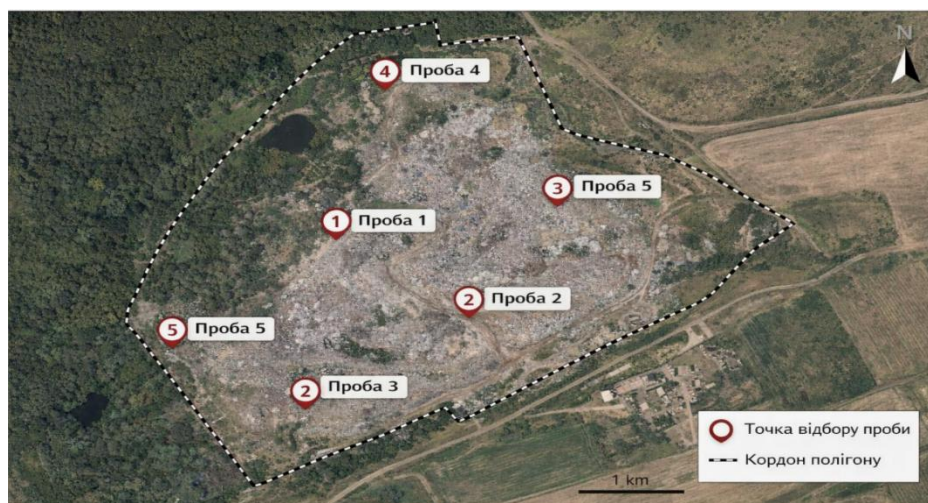


Рисунок 1. Просторове розміщення точок відбору ґрунтових проб у межах Ужгородського полігону побутових відходів (горизонт 0-20 см)

Відбір ґрунтових зразків здійснювали з поверхневого шару глибиною 0–20 см, який є найбільш чутливим до техногенного навантаження та відображає сучасний стан забруднення. Усі точки відбору розміщені в межах одного полігону, що забезпечувало співставлення кліматичних умов та дозволяло інтерпретувати виявлені відмінності як результат локальних процесів.

Дослідження проводили у різні сезони року, а саме в осінній, весняний та літній періоди, що дало змогу оцінити вплив сезонної мінливості гідрометеорологічних факторів на формування просторових градієнтів важких металів. Відбір зразків у кожному сезоні здійснювали за однаковою методикою, що забезпечило коректність порівняння отриманих результатів.

Вміст важких металів у ґрунтах визначали методом атомно-абсорбційної спектроскопії відповідно до вимог ДСТУ ISO 11047:2005. Аналіз проводили для свинцю (Pb), арсену (As), міді (Cu), кадмію (Cd) та ртуті (Hg). Результати визначення наведені у мг/кг сухої маси ґрунту. Вибір досліджуваних елементів обумовлений їх поширеністю у складі побутових відходів та високою екологічною значущістю¹⁵.

Оцінку рівня забруднення здійснювали шляхом порівняння отриманих значень із гранично допустимими концентраціями, встановленими згідно з Наказом МОЗ України № 1596 від 14.07.2020 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті»¹⁶. Нормативні значення ГДК для досліджених елементів становлять: Pb – 32,0 мг/кг, Cd – 0,5 мг/кг, Hg – 2,1 мг/кг, As – 2,0 мг/кг, Cu – 33,0 мг/кг.

Для обробки та інтерпретації результатів застосовували порівняльний аналіз, що дозволив оцінити відмінності між окремими ділянками полігону та сезонними періодами. Просторові градієнти визначали шляхом зіставлення концентрацій важких металів у різних частинах полігону, а сезонну динаміку - шляхом аналізу їх змін у часі.

Отримані дані розглядали з позиції оцінки екологічного ризику, що дозволило визначити ділянки з підвищеним рівнем техногенного навантаження та потенційною небезпекою для довкілля.

¹⁵ Skrobala, V., Popovych, V., Pinder, V. Ecological patterns for vegetation cover formation in the mining waste dumps of the Lviv-Volyn coal basin. *Mining of Mineral Deposits*, 2020. No. 14. P. 119-127. URL: <https://10.33271/mining14.02.119>

¹⁶ Міністерство охорони здоров'я України. Гігієнічні регламенти допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті (Наказ № 1596 від 14.07.2020). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>

Свинець характеризується найбільш вираженим просторовим розподілом. Максимальні концентрації стабільно фіксуються в центральній частині полігону в усі досліджувані періоди. При цьому спостерігається чітка сезонна тенденція до зростання його вмісту від осені до літа. Така динаміка свідчить про поступове накопичення елемента у зоні, де відбувається інтенсивна акумуляція фільтрату та обмежене вимивання. У південній та західній частинах значення є дещо нижчими, однак зберігають підвищений рівень, що вказує на поширення забруднення за межі центральної ділянки. Найменші концентрації зафіксовані у північній та східній частинах, що може бути пов'язано з кращими умовами дренажу або меншою інтенсивністю накопичення відходів (рис. 2)

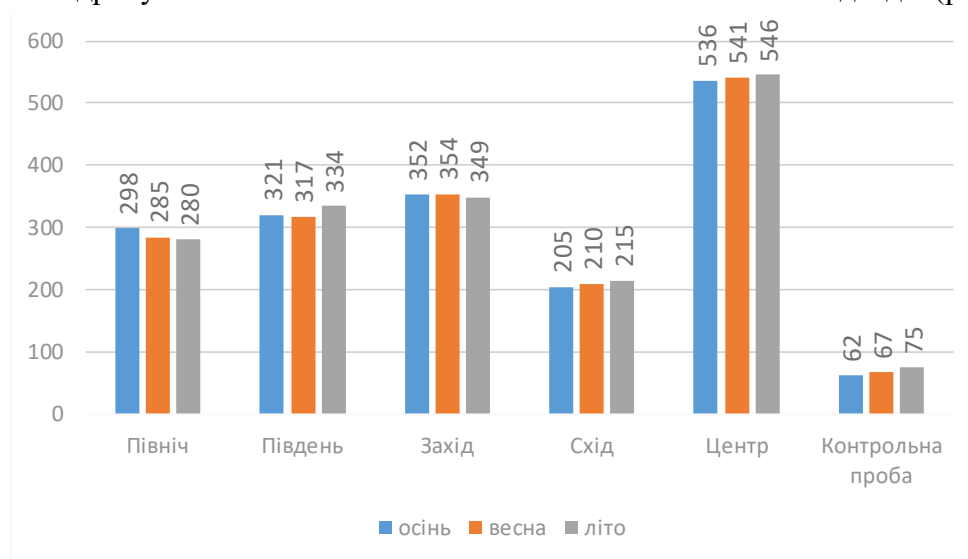


Рисунок 2. Просторово-сезонний розподіл концентрації Pb (мг/кг) у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів

Арсен демонструє більш рівномірний розподіл у межах полігону (рис. 3). Його концентрації коливаються у вузькому діапазоні та не мають різко виражених сезонних піків. Водночас простежується тенденція до дещо підвищених значень у центральній та західній частинах полігону. Така поведінка може бути зумовлена низькою рухомістю арсену у ґрунтовому середовищі та його здатністю до фіксації у мінеральній матриці. Відсутність різких змін у часі вказує на стабільний характер його накопичення.

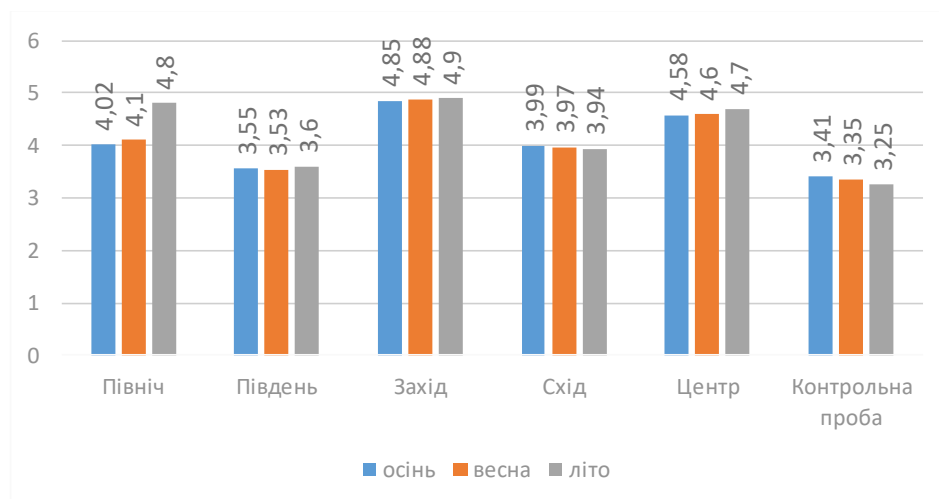


Рисунок 3. Просторово-сезонний розподіл концентрації As (мг/кг) у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів

Розподіл купруму суттєво відрізняється від інших досліджених елементів (рис. 4). Найвищі концентрації зафіксовані у південній частині полігону, що може бути пов'язано з локальними особливостями накопичення відходів або специфікою їх складу. У більшості точок спостерігається тенденція до зниження вмісту купруму у весняно-літній період порівняно з осіннім. Це може свідчити про її перехід у менш рухомі форми або зв'язування з органічною речовиною, яка активно трансформується в теплий період. Таким чином, для купруму характерна не лише просторова, але й хімічно обумовлена варіабельність.

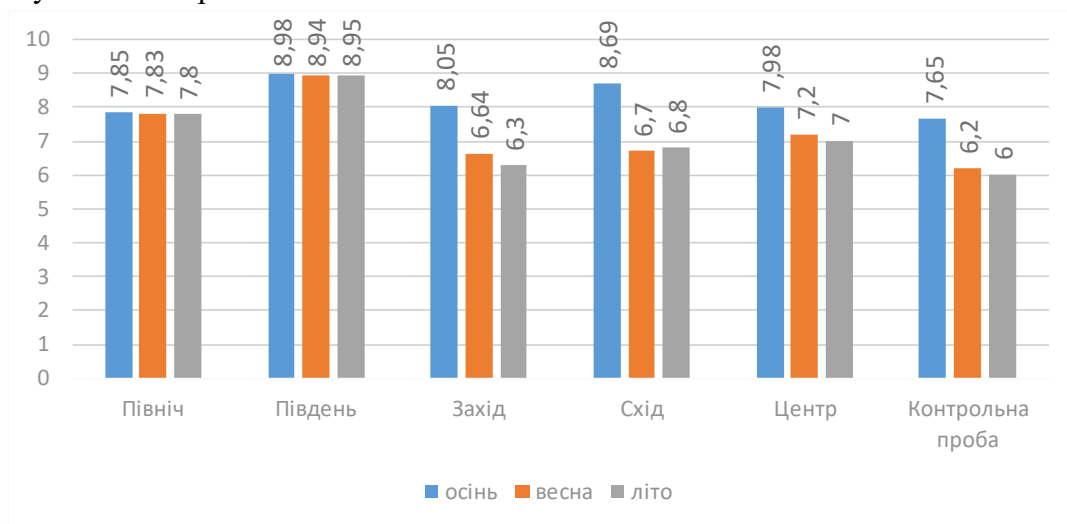


Рисунок 4. Просторово-сезонний розподіл концентрації Cu (мг/кг)
у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів

Кадмій є найбільш чутливим до сезонних змін елементом (рис. 5). Як показали аналізи у центральній частині полігону його концентрація різко зростає у літній період, досягаючи максимальних значень серед усіх досліджених металів. Така поведінка свідчить про активізацію процесів міграції під впливом температури та змін водного режиму. У інших частинах полігону, концентрації залишаються відносно стабільними, що підкреслює локалізований характер накопичення. Висока варіабельність кадмію вказує на його значну рухомість та екологічну небезпеку.

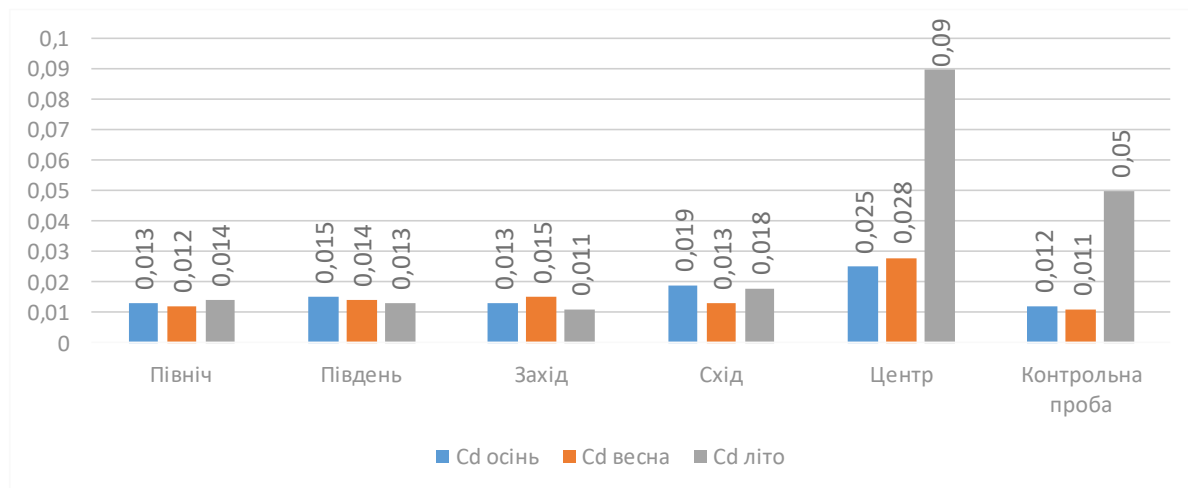


Рисунок 5. Просторово-сезонний розподіл концентрації Cd (мг/кг)
у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів

Ртуть, на відміну від інших елементів, характеризується практично однорідним розподілом (рис. 6). Її концентрації залишаються стабільними у всіх точках та у всі сезони, без виражених максимумів або мінімумів. Це може свідчити про низьку інтенсивність надходження або про її переважання у малорухомих формах, що не беруть участі в активній міграції. У результаті ртуть не формує чітких просторових градієнтів у межах досліджуваної території.

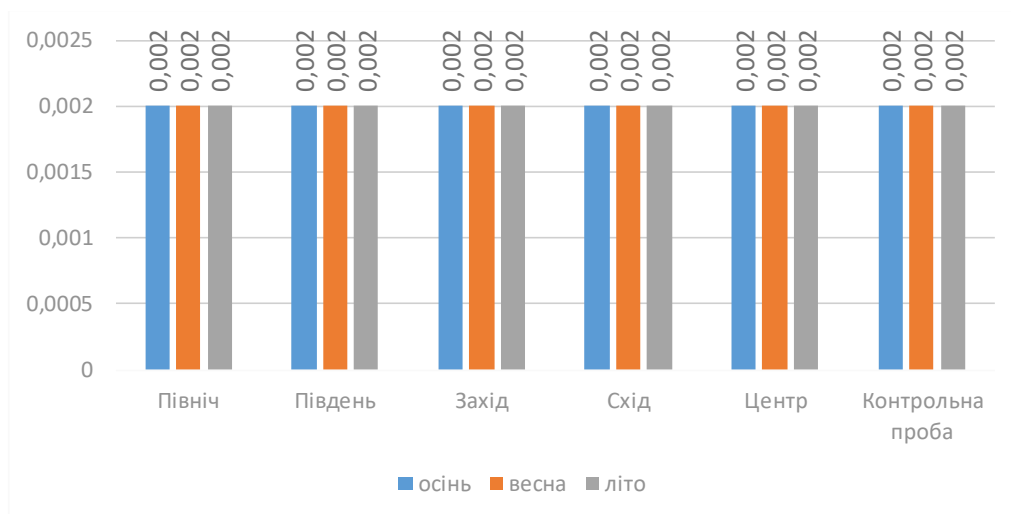


Рисунок 6. Просторово-сезонний розподіл концентрації Hg (мг/кг) у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів

Отримані результати свідчать, що розподіл важких металів у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів, має чітко виражений просторовий характер із формуванням локальних зон підвищених концентрацій. Найбільші значення більшості елементів зафіксовані у центральній частині полігону. Зокрема, концентрація плумбуму досягає 536–546 мг/кг у літній період, що суттєво перевищує показники інших ділянок і свідчить про інтенсивне накопичення у цій зоні. Такий рівень вказує на формування стабільного осередку акумуляції забруднювачів.

Периферійні ділянки характеризуються нижчими концентраціями плумбуму, однак їх значення залишаються високими та коливаються у межах 280–352 мг/кг, що свідчить про поширення забруднення за межі центральної частини полігону. Найменші значення зафіксовані у контрольній пробі – 62–75 мг/кг, проте навіть вони відображають підвищений рівень техногенного впливу.

Розподіл арсену є більш рівномірним. Його концентрації коливаються у вузькому діапазоні від 3,25 до 4,90 мг/кг. Максимальні значення 4,85–4,90 мг/кг зафіксовані у західній частині полігону, тоді як у південній частині вони знижуються до 3,5–3,6 мг/кг. Незважаючи на меншу варіабельність, спостерігається стабільне перевищення контрольних значень, що свідчить про постійний характер забруднення.

Купрум демонструє іншу закономірність розподілу. Найвищі концентрації зафіксовані у південній частині полігону та становлять 8,98–9,14 мг/кг. У той же час у західній частині спостерігається зниження до 6,3–6,85 мг/кг. Для більшості ділянок характерне зменшення концентрацій у весняно-літній період порівняно з осіннім, що вказує на зміну форм перебування елемента або його перерозподіл у ґрунтовому середовищі.

Кадмій характеризується найбільш вираженою сезонною динамікою. У центральній частині полігону його концентрація зростає з 0,025–0,028 мг/кг у весняний період, до 0,09 мг/кг у літній. Це є максимальним значенням серед усіх досліджених ділянок і вказує на активізацію процесів

міграції. В інших частинах полігону концентрації кадмію залишаються значно нижчими та коливаються у межах 0,011-0,019 мг/кг, що підкреслює локальний характер його накопичення.

Ртуть демонструє практично повну стабільність. У всіх досліджених точках та у всі сезони її концентрація становить близько 0,002 мг/кг, без суттєвих відхилень. Це свідчить про відсутність виражених процесів накопичення або міграції цього елемента в межах полігону.

Загалом результати вказують на формування чіткої структури забруднення, у якій центральна частина полігону виконує функцію основної зони акумуляції, тоді як периферійні ділянки характеризуються менш інтенсивним, але стійким забрудненням. Сезонні зміни, особливо у літній період, посилюють контраст між окремими ділянками, що свідчить про активізацію процесів перерозподілу важких металів у ґрунтовому середовищі.

Важливим аспектом було проведення оцінки екологічного ризику. Оцінювання проводилось шляхом порівняння отриманих концентрацій важких металів у ґрунтах із гранично допустимими концентраціями, встановленими відповідно до чинних нормативів України (Наказ МОЗ України № 1596 від 14.07.2020 р.). Це дозволяє визначити ступінь техногенного навантаження на ґрунтовий покрив та виявити ділянки з потенційно небезпечним рівнем забруднення¹⁷.

Аналіз отриманих даних показав, що для плумбу у центральній частині полігону спостерігається суттєве перевищення нормативного значення – 32 мг/кг, особливо у літній період. Високі концентрації цього елемента також фіксуються у південній та західній частинах, що свідчить про формування стійкої зони підвищеного ризику. Такий рівень забруднення може негативно впливати на біоту ґрунту та створювати передумови для включення свинцю у трофічні ланцюги.

Для кадмію, який характеризується високою токсичністю навіть у незначних концентраціях, у центральній частині полігону зафіксовано перевищення гранично допустимих концентрацій – 0,5 мг/кг, що особливо проявляється у літній період. З огляду на високу рухомість цього елемента, його накопичення створює підвищений екологічний ризик, пов'язаний із можливим міграційним перенесенням у суміжні компоненти довкілля.

Концентрації купруму у більшості випадків не перевищують нормативного значення у 33 мг/кг, однак на окремих ділянках, зокрема у південній частині полігону, спостерігається наближення до граничних рівнів. Це вказує на потенційну небезпеку локального накопичення, особливо за умов зміни фізико-хімічних властивостей ґрунту.

Арсен характеризується концентраціями, що у ряді випадків перевищують встановлене нормативне значення 2,0 мг/кг, що свідчить про наявність додаткових джерел надходження або про особливості геохімічного середовища. З урахуванням токсичних властивостей цього елемента навіть незначні перевищення можуть мати екологічне значення.

Ртуть не демонструє перевищення гранично допустимих концентрацій – 2,1 мг/кг у жодній із досліджених ділянок, що дозволяє оцінити рівень її впливу як відносно низький у межах даного полігону.

Загалом найбільш небезпечними з точки зору екологічного ризику є центральні ділянки полігону, де спостерігається одночасне накопичення кількох важких металів та перевищення нормативних значень. Поєднання високих концентрацій, сезонної динаміки та підвищеної рухомості окремих елементів створює умови для формування зон підвищеного екологічного навантаження.

¹⁷ Міністерство охорони здоров'я України. Гігієнічні регламенти допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті (Наказ № 1596 від 14.07.2020). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>

Отримані результати свідчать про необхідність систематичного моніторингу ґрунтів полігону та прилеглих територій, а також впровадження заходів, спрямованих на зменшення міграції важких металів і локалізацію зон їх накопичення.

ГОЛОВНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень встановлено, що ґрунти Ужгородського полігону твердих побутових відходів характеризуються вираженою просторовою та сезонною неоднорідністю розподілу важких металів. Виявлено формування чітких градієнтів забруднення, при яких максимальні концентрації більшості елементів виявлені у центральній частині полігону. Для плумбуму концентрації досягають діапазону 536-546 мг/кг, що свідчить про інтенсивне накопичення у зоні акумуляції фільтрату.

Показано, що периферійні ділянки полігону характеризуються нижчими, та все ж стабільно підвищеними концентраціями (для плумбуму у межах 280-352 мг/кг), що підтверджує поширення забруднення за межі центральної зони та формування стійкого просторового градієнта.

Встановлено суттєвий вплив сезонних умов на перерозподіл важких металів. У теплий період відбувається активізація процесів міграції, що найбільш виражено для кадмію, концентрації якого у центральній частині зростають до 0,09 мг/кг. Це вказує на його високу рухомість і чутливість до змін температури та водного режиму.

Показано, що поведінка металів має диференційований характер. Плумбум і кадмій формують зони локального накопичення, арсен демонструє стабільно підвищений рівень – 3,25-4,90 мг/кг без різких сезонних змін, тоді як ртуть характеризується практично незмінною концентрацією – 0,002 мг/кг, що свідчить про її низьку рухомість. Мідь проявляє змінну поведінку з тенденцією до зниження у теплий період. Оцінка екологічного ризику показала, що у межах полігону формуються зони підвищеного техногенного навантаження з перевищенням гранично допустимих концентрацій для плумбуму, кадмію та арсену. Найбільш небезпечною є центральна частина полігону, де поєднуються високі концентрації та активні процеси міграції.

Встановлено, що Ужгородський полігон побутових відходів функціонує як динамічна геохімічна система, у якій відбувається не лише накопичення, але й активний перерозподіл важких металів. Отримані результати підтверджують необхідність урахування просторової та сезонної мінливості при оцінці стану ґрунтів і свідчать про доцільність посилення моніторингу та впровадження заходів із локалізації забруднення.

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ПОЖЕЖ У КАРПАТСЬКОМУ ЛІСОГОСПОДАРСЬКОМУ РАЙОНІ НА ДОВКІЛЛЯ

CHARACTERISTICS OF THE IMPACT OF FIRES IN THE CARPATHIAN FORESTRY DISTRICT ON THE ENVIRONMENT

Ляшевич Михайло Михайлович, аспірант, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, misailasevic18@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0089-2543>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.04>

Анотація. Горіння рослинності та органічної речовини під час лісових пожеж вивільняє значну кількість диму (що містить CO₂, поліциклічні ароматичні вуглеводні, дрібні тверді частинки тощо), що знижує якість повітря та негативно впливає на здоров'я тварин і людей. Із початку 2026 року в Україні зафіксовано 2547 пожеж у природних екосистемах, які знищили понад 93 тисячі гектарів землі. Основною причиною є людська недбалість та спалювання сухоостою, особливо у Львівській, Київській та Дніпропетровській областях. В Україні в середньому щорічно виникає близько 3500 лісових пожеж, в результаті яких вигорає понад 5000 га лісу. У 2022 році кількість пожеж в Україні була в 1,5 рази більше порівняно з 2021 роком, а збитки становили 438,9 млн. грн. У понад 200 випадках площа пожеж займала більше ніж 5 га. Основними причинами пожеж (62 %) були загоряння в насадженнях через активні бойові дії, ракетні обстріли та снарядами, наявність вибухонебезпечних предметів. У 2025 році в Україні зафіксували 61865 пожеж у природних екосистемах та на відкритих територіях. Загальні матеріальні втрати від цих пожеж у 2025 році склали понад 2,1 млрд грн. Із цієї суми близько 408 млн грн — це знищене майно, інфраструктура, техніка тощо. Ще в понад 1,7 млрд грн оцінюються шкода довкіллю, наслідки для здоров'я людей та економіки. Ці показники не враховують окуповані території. Одним із напрямків негативного впливу пожеж у природних екосистемах в Карпатському лісогосподарському районі є вплив на поверхневі природні води, які є вагомою складовою водозабезпечення України.

Ключові слова: пожежа, природна екосистема, клімат, лісова пожежа, екологія, рослинність, ґрунти.

Abstract. The burning of vegetation and organic matter during wildfires releases significant amounts of smoke (containing CO₂, polycyclic aromatic hydrocarbons, fine particulate matter, etc.), which degrades air quality and negatively impacts the health of animals and humans. Since the beginning of 2026, Ukraine has recorded 2,547 fires in natural ecosystems, which have destroyed over 93,000 hectares of land. The main causes are human negligence and the burning of dry vegetation, particularly in the Lviv, Kyiv, and Dnipropetrovsk regions. On average, about 3,500 forest fires occur annually in Ukraine, resulting in the loss of over 5,000 hectares of forest. In 2022, the number of fires in Ukraine was 1.5 times higher than in 2021, and the damages amounted to 438.9 million UAH. In over 200 cases, the fire area exceeded 5 hectares. The main causes of the fires (62%) were fires in forested areas due to active hostilities, rocket and artillery shelling, and the presence of explosive objects. In 2025, Ukraine recorded 61,865 fires in natural ecosystems and open areas. Total material losses from these fires in 2025 amounted to over 2.1 billion UAH. Of this amount, approximately 408 million UAH represents destroyed property, infrastructure, equipment, and the like. Damage to the environment, as well as the consequences for human health and the

economy, are estimated at over 1.7 billion UAH. These figures do not include the occupied territories. One of the negative impacts of fires in natural ecosystems in the Carpathian Forestry Region is the effect on surface natural waters, which are a significant component of Ukraine's water supply.

Keywords: fire, natural ecosystem, climate, forest fire, ecology, vegetation, soils.

ВСТУП

Пожежі у природних екосистемах носять глобальний характер та виникають практично у всіх кутках нашої планети. Характер пожеж у природних екосистемах залежить від багатьох чинників, основними із яких є кліматичні та едафічні умови. Значним чинником поширення пожеж у природних екосистемах є фізіологічна стійкість рослинності, зокрема температурна стійкість, а також реалізація протипожежних заходів на відкритих територіях та у лісових масивах. Станом на листопад 2024 року в Україні лісовими пожежами було охоплено більше земель, ніж у будь-якій іншій країні Європи. Охоплено було понад 906000 гектарів через лісові та пожежі в екосистемах. Це значно перевищує середній показник у 42000 гектарів між 2006 і 2023 роками (рис. 1).

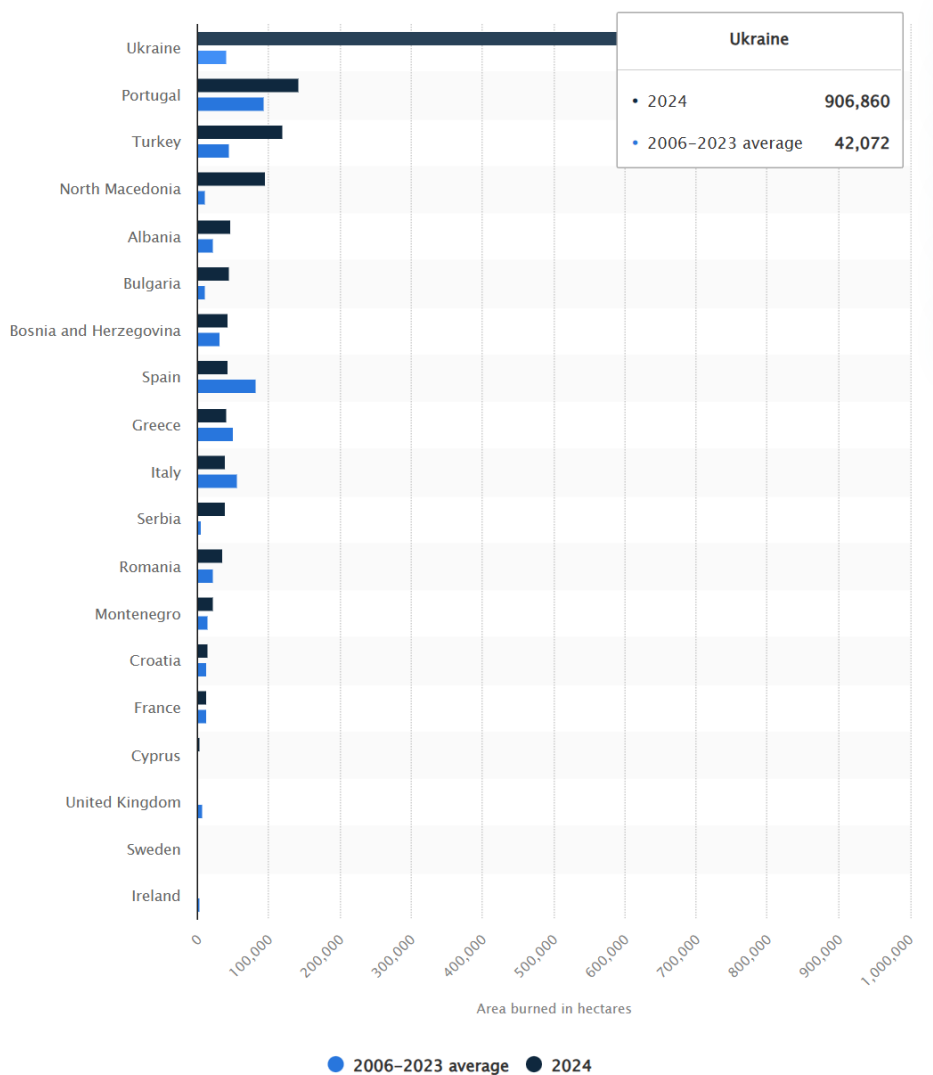


Рисунок 1. Площа, охоплена лісовими пожежами в Європі у 2024 році, із середнім показником за 2006–2023 роки, за країнами (у гектарах)¹

¹ Офіційний сайт Statista: <https://www.statista.com/statistics/1260777/area-burned-by-wildfire-in-european-countries/>.

Горіння рослинності та органічної речовини під час лісових пожеж вивільняє значну кількість диму (що містить CO_2 , поліциклічні ароматичні вуглеводні, дрібні тверді частинки тощо), що знижує якість повітря та негативно впливає на здоров'я тварин і людей. Попіл від лісових пожеж викликає енергетичний дисбаланс, який може обмежувати функції всіх тварин, включаючи зниження росту та розвитку. Вивільнення забруднюючих речовин, таких як тверді частинки та леткі органічні сполуки, під час лісових пожеж, має шкідливий вплив на людину, дику природу та водні організми². Площа, охоплена лісовими пожежами в Європі у 2024 році, із середнім показником за 2006–2023 роки, за країнами наведено на рис. 1.

Великі порушення, такі як пожежі та повені, – це ландшафтні процеси, які можуть змінити структуру ландшафтів у природних заповідниках. Структура ландшафту, у свою чергу, може впливати на життєздатність видів та функціонування екосистем³. Понад 70% вигорілих площ у Каталонії становили ліси, чагарники та луки, тоді як понад 50% осередків пожеж становили оброблювані землі. Чагарники та луки горіли непропорційно більше, ніж лісові території, порівняно із середніми значеннями земного покриву. Навколо країв пожеж дороги, водотоки та оброблювані землі були поширенішими, ніж у середньому в Каталонії. Результати показують, що сільськогосподарська діяльність важлива для забезпечення пожежних укриттів, а також для сприяння стримуванню пожеж⁴. Посушливі чагарники найчастіше демонстрували підвищені викиди NO та N_2O після пожежі, тоді як луки демонстрували ефемерні імпульси ґрунтового NO без суттєвого впливу на викиди N_2O . Викиди N_2O в тропічних лісах збільшилися, але бореальні та помірні ліси мали тенденцію до зниження виділення N_2O після пожеж. Пожежі у природних екосистемах можуть збільшити викиди NO та N_2O з ґрунту із потенційними довгостроковими наслідками щодо втрати азоту в екосистемі та кліматичних зворотних зв'язків⁵.

У багатьох випадках вогонь є ключем до розуміння екології популяцій, спільнот та екосистем. Теорії про те, як вогонь взаємодіє з еволюційними процесами, тільки починають розвиватися, і, хоча наразі вони зосереджені переважно на рослинах, ці теорії готові до швидкого розвитку у сфері тварин та мікробів. Дослідницька спільнота з екології пожеж за останні роки досягла величезного прогресу в розумінні багатьох аспектів пожеж та пожежних режимів, включаючи кількість, час, зміни та кінцевий вплив пожеж на земну систему⁶. Стійкість екосистем у певному регіоні може бути знижена внаслідок підвищення температури, посухи, землекористування та вигорання. Існує потенціал для втрати 30% вуглецю рослинністю, якщо глобальне потепління досягне 4°C до кінця століття. Однак, підтримка температури на рівні цільового показника Паризької угоди в $1,5^\circ\text{C}$ може допомогти зменшити найгірші наслідки, обмеживши втрати вуглецю рослинністю до 7%⁷.

N ґрунту в місці вигорання був на 440% вищим, ніж N незгорілого ґрунту на початку першого вологого сезону після пожежі і протягом 66 днів повернувся до допожежного рівня. Експорт азоту був на 1480% вищим, ніж експорт до пожежі під час першого післяпожежного дощу і повернувся

² Bolan, S., Sharma, S., Mukherjee, S. et al. Wildfires under changing climate, and their environmental and health impacts. *J Soils Sediments* (2025). <https://doi.org/10.1007/s11368-025-04020-y>.

³ Baker, W.L. The landscape ecology of large disturbances in the design and management of nature reserves. *Landscape Ecol* 7, 181–194 (1992). <https://doi.org/10.1007/BF00133309>.

⁴ Newman Thacker, F.E., Bartholomeus, H., Rosell Ibarz, M. et al. Characterising land cover—wildfire interactions in Catalonia and their implications for resilience. *fire ecol* 21, 31 (2025). <https://doi.org/10.1186/s42408-025-00372-5>.

⁵ Stephens, E.Z., Homyak, P.M. Post-fire soil emissions of nitric oxide (NO) and nitrous oxide (N_2O) across global ecosystems: a review. *Biogeochemistry* 165, 291–309 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10533-023-01072-5>.

⁶ McLauchlan KK, Higuera PE, Miesel J, et al. Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *J Ecol.* 2020; 108: 2047–2069. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>.

⁷ Burton, C., Kelley, D.I., Jones, C. D., Betts, R. A., Cardoso, M., & Anderson, L. (2022). South American fires and their impacts on ecosystems increase with continued emissions. *Climate Resilience and Sustainability*, 1(1), e8.

протягом 106 днів протягом наступних трьох злив до рівня до пожежі. Баланс маси азоту в масштабі водозбору показав, що 52% азоту від лісових пожеж може бути пояснено ростом рослин і ґрунтових мікробів, тоді як 1% може бути пояснено експортом розчиненого азоту потоком⁸.

На вигорілих ділянках нітрифікація була значно підвищена порівняно із невивгорілими ділянками. Трави швидко вкоренилися після перших дощів після пожежі. Надземна біомаса рослин засвоювала азот відповідно до мінералізації ґрунту, що свідчить про щільний цикл азоту на ранніх стадіях відновлення. З іншого боку, мікробна біомаса азоту залишалася низькою протягом усього дослідження. Ці результати підкреслюють важливість трав'янистих видів у збереженні поживних речовин екосистеми, оскільки чагарники поступово відновлюються⁹.

Співвідношення C/N листя, коренів та мікробної біомаси *Microstegium* були значно ширшими при частих пожежах, ніж при їх відсутності. Відповідно до цих закономірностей, концентрація розчиненого органічного азоту була на 22% нижчою, а активність екзоферменту, що спрямований на поглинання N, була на 59% вищою при частих пожежах. Це свідчить, що часті пожежі збільшують обмеження мікробного азоту. Вищий вміст вуглецю та азоту в поверхні ґрунту, а також збільшення вмісту азоту у твердих частинках органічної речовини ґрунту, спричинене пожежами, свідчать про те, що часті пожежі в цих лісах, вкритих травою, посилювали обмеження мікробного азоту через накопичення мікробно-стійкого пірогенного азоту¹⁰.

Спостерігали сильне збільшення рівня азоту (N) у ґрунті після пожежі, яке було найбільшим у ґрунті з переважанням чагарників; однак домінуюча рослинність мала вплив на мікробні угруповання. Активність ферментів була знижена в ґрунті з переважанням чагарників, але реакція ґрунту з переважанням трав була непослідовною. Через 1 рік рівень азоту в ґрунті залишався підвищеним у вигорілому ґрунті, що свідчить про зміну концентрацій N¹¹.

Результати авторів¹² показали, що хоча деякі властивості ґрунту повернулися до рівнів, що були до пожеж, у середньостроковій перспективі (катіони ґрунту та NH₄⁺), інші, такі як доступний фосфор (P), демонстрували значне зниження, що зберігалось навіть через 18 місяців. Крім того, ґрунти під бобовими спочатку демонстрували вищий рівень вуглецю та азоту ґрунту порівняно з іншими рослинними ділянками, але ця різниця з часом зменшилася. Це, ймовірно, пов'язано зі схильністю бобових рослин до пошкодження вогнем, на відміну від більшої стійкості чагарників родини *Ericaceae*.

Вогонь сформував різні екосистеми у східних широколистяних та Аппалачських лісах вздовж складних геоморфологічних градієнтів. Повторний вогонь, або його відсутність, має значні наслідки для структури лісу, видового складу та функціонування екосистеми¹³.

Збільшення кількості листяних чагарників, таких як *Betula nana*, ймовірно, сприяє втраті вуглецю в ґрунті, тоді як навпаки може бути правдою, якщо кількість вічнозелених чагарників,

⁸ Goodridge, B.M., Hanan, E.J., Aguilera, R. et al. Retention of Nitrogen Following Wildfire in a Chaparral Ecosystem. *Ecosystems* 21, 1608–1622 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0243-3>.

⁹ Hanan, E.J., D'Antonio, C.M., Roberts, D.A. et al. Factors Regulating Nitrogen Retention During the Early Stages of Recovery from Fire in Coastal Chaparral Ecosystems. *Ecosystems* 19, 910–926 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10021-016-9975-0>.

¹⁰ Fraterrigo, J.M., Rembelski, M.K. Frequent Fire Reduces the Magnitude of Positive Interactions Between an Invasive Grass and Soil Microbes in Temperate Forests. *Ecosystems* 24, 1738–1755 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00615-x>.

¹¹ Zalman, C., Hanna, E., Rush, J. et al. Vegetation type and fire severity mediate short-term post fire soil microbial responses. *Plant Soil* 484, 155–170 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05776-9>.

¹² Ibáñez, M., Manjón-Cabeza, J., Chowdhury, S. et al. Prescribed burning modifies soil fertility and microbial biomass mediated by vegetation in Mediterranean mountain rangelands. *Plant Soil* (2025). <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07441-3>.

¹³ Arthur, M.A. et al. (2021). Fire Ecology and Management in Eastern Broadleaf and Appalachian Forests. In: Greenberg, C.H., Collins, B. (eds) *Fire Ecology and Management: Past, Present, and Future of US Forested Ecosystems*. Managing Forest Ecosystems, vol 39. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73267-7_4.

таких як *Empetrum hermaphroditum*, збільшується. Азот мікробної біомаси негативно корелював з щільністю вічнозелених чагарників на обох ділянках, що вказує на те, що заростання чагарниками могло посилити конкуренцію за поживні речовини між рослинами та ґрунтовими мікроорганізмами¹⁴.

Відображено перехід лісу *Pinus sylvestris* до ранніх сукцесійних широколистяних дерев. Сіянци та саджанці *Betula pendula* почали домінувати через 10 та 5 років після пожежі відповідно. Сіянци *Pinus sylvestris* показали подібну чисельність, як *Betula pendula* та *Populus tremula* через 5 років після пожежі, але після цього різко скоротилися. Ми виявили синхронізовані, але видові закономірності зниження чисельності сіянців та нарощування площі основи саджанців у ранніх сукцесійних широколистяних деревах. Саджанці *Fagus sylvatica*, *Picea abies* та *Pinus sylvestris* показали синхронізоване відновлення через 15 років після пожежі¹⁵. *Austrocedrus chilensis* та *Aristotelia chilensis* відіграють ключову роль у відновленні після пожеж, маючи найбільшу кількість насіння на всіх досліджуваних ділянках. Відновлення лісів після порушення є глобальною проблемою, особливо в контексті масштабних лісових пожеж¹⁶.

Використовуючи зразки ґрунту з 16-річних польових дослідів з потеплінням і додаванням підстилки, виміряно запаси С та N у ґрунті, гетеротрофне дихання, позаклітинну ферментну активність та мікробну стехіометрію. Потепління зменшило запаси С та N по всьому ґрунтовому профілю. Аналізи за глибиною показали, що ці зміни зумовлені збільшенням мікробної активності на глибині 5–10 та 10–15 см, а також тенденціями до вищого вмісту розчиненого органічного С та N на глибині 5–10 см. Встановлено, що додавання підстилки не змінило загальних запасів вуглецю та азоту, але цей процес змінює екосистему, додаючи поживні речовини та вуглецю до ґрунту¹⁷. Перегорілі ділянки продемонстрували адаптацію до вогню зі швидким поширенням кількох пірофільних родів мікроміцетів, здатних покращувати стан ґрунту, що сприяє післяпожежній регенерації насадження. Відносна чисельність ектомікоризних грибів зазнала негативного впливу горіння, тоді як сапротрофні гриби зазнали позитивного впливу горіння. Вогонь також мав вплив на склад угруповання при аналізі за трофічною групою¹⁸.

Встановлено, що в 11 австралійських регіонах 17 основних родин рослинності сильно постраждали від вогню, а також 67–83% тропічних та евкаліптових лісів. На основі даних про поширення видів оцінено, що >50% відомих популяцій або ареалів 816 місцевих видів судинних рослин вигоріли під час пожеж, включаючи понад 100 видів з географічним ареалом понад 500 км. Дані про середовище існування та реагування на пожежі показують, що більшість постраждалих видів стійкі до вогню¹⁹.

Таким чином, вивчення розвитку пожеж у природних екосистемах Карпатського лісогосподарського району є актуальним питанням екологічної безпеки регіону.

¹⁴ Stark, S., Kumar, M., Myrsky, E. et al. Decreased Soil Microbial Nitrogen Under Vegetation ‘Shrubification’ in the Subarctic Forest–Tundra Ecotone: The Potential Role of Increasing Nutrient Competition Between Plants and Soil Microorganisms. *Ecosystems* 26, 1504–1523 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10021-023-00847-z>.

¹⁵ Holík, J., Janík, D., Šamonil, P. et al. Topographic conditions dominate tree species recovery over 15 years post-fire in a temperate *Pinus sylvestris* forest. *fire ecol* 21, 29 (2025). <https://doi.org/10.1186/s42408-025-00374-3>.

¹⁶ Simon, A., Bravo Almeida, P., Geitner, C. et al. Soil redistribution and seed availability after fire events in mixed *Austrocedrus chilensis* forests in Northern Patagonia (Argentina). *fire ecol* 21, 13 (2025). <https://doi.org/10.1186/s42408-025-00354-7>.

¹⁷ Phillips, C.A., Elberling, B. & Michelsen, A. Soil Carbon and Nitrogen Stocks and Turnover Following 16 Years of Warming and Litter Addition. *Ecosystems* 22, 110–124 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0256-y>.

¹⁸ Espinosa, J., Carrillo, C., Madrigal, J. et al. Experimental summer fires do not affect fungal diversity but do shape fungal community composition in Mediterranean *Pinus nigra* forests. *fire ecol* 21, 16 (2025). <https://doi.org/10.1186/s42408-025-00352-9>.

¹⁹ Godfree, R.C., Knerr, N., Encinas-Viso, F. et al. Implications of the 2019–2020 megafires for the biogeography and conservation of Australian vegetation. *Nat Commun* 12, 1023 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21266-5>.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі використано описовий, статистичний, польовий, ґрунтознавчий, геоботанічний та флористичний методи досліджень.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Із початку 2026 року в Україні зафіксовано 2547 пожеж у природних екосистемах, які знищили понад 93 тисячі гектарів землі. Основною причиною є людська недбалість та спалювання сухостою, особливо у Львівській, Київській та Дніпропетровській областях. За підпали на відкритому просторі передбачено штрафи від 3060 до 12240 грн.

Окрім небезпечних продуктів горіння від спалювання сухої трави, рослинних та порубкових решток існує небезпека потрапляння в атмосферу небезпечних токсичних речовин внаслідок горіння побутових відходів із вмістом пластику²⁰. Горіння полімерних відходів спричиняє потрапляння в довкілля таких небезпечних речовин як діоксини, синильна кислота, чадний газ тощо²¹. Чадний газ викликає гостре кисневе голодування, синильна кислота миттєво блокує клітинне дихання, а діоксини – стійкі отрути, що накопичуються, руйнуючи імунну та гормональну системи. Всі три речовини можуть призвести до важких отруєнь або смерті^{22, 23}. Значною небезпекою для довкілля є горіння породних відвалів вугільних шахт^{24, 25}. Слід зазначити, що для гасіння пожеж у природних екосистемах необхідно задіювати велику кількість сил і засобів, особливо у місцях із відсутніми вододжерелами.

Дослідження екологічного стану територій природних екосистем, які зазнали впливу пожеж проводилися на території Ужгородського району. Встановлено, що за останні роки внаслідок зміни клімату зросла кількість пожеж від природного чинника^{26, 27}.

Упродовж 2025 року в Україні було зареєстровано 99298 пожеж. Порівняно з 2024 роком кількість пожеж зменшилася на 5,6 %, що відбулося, насамперед, за рахунок зменшення кількості пожеж на відкритих територіях (-9,1 %) та у будинках та спорудах житлового призначення (-9,0 %), питома вага яких разом становить 86,0 % від їх загальної кількості. Унаслідок пожеж загинуло 1725 людей, у тому числі загинуло 52 дитини; 2129 людей отримали травми, у тому числі травмовано 158 дітей²⁸.

У 2025 році в Україні зафіксували 61865 пожеж у природних екосистемах та на відкритих територіях. Загальні матеріальні втрати від цих пожеж у 2025 році склали понад 2,1 млрд грн. Із цієї суми близько 408 млн грн — це знищене майно, інфраструктура, техніка тощо. Ще в понад 1,7 млрд грн оцінюються шкода довкіллю, наслідки для здоров'я людей та економіки. Ці показники не

²⁰ Попович, В. В. (2012). Пожежна безпека стихійних сміттєзвалищ та полігонів твердих побутових відходів. Пожежна безпека, (21), 140-147.

²¹ Попович, В. В., & Кучерявий, В. П. (2012). Горіння полігонів твердих побутових відходів як загроза здоров'ю людини та фактор техногенного навантаження на довкілля. Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету, (1), 162-166.

²² Офіційний сайт Міністерства охорони здоров'я України: <https://moz.gov.ua/uk/scho-treba-znati-pro-otruennja-chadnim-gazom-i-jak-jomu-zarobigti>.

²³ Попович, В. В., & Кучерявий, В. П. (2012). Вплив продуктів горіння полігонів твердих побутових відходів на організм людини та біоту. Пожежна безпека, (20), 60-66.

²⁴ Попович, В. В. (2009). Терикони Нововолинського гірничопромислового району та їхній вплив на довкілля. Науковий вісник НЛТУ України, 19(15), 136-140.

²⁵ Skrobala, V., Popovych, V., & Pinder, V. (2020). Ecological patterns for vegetation cover formation in the mining waste dumps of the Lviv-Volyn coal basin. Mining of Mineral Deposits. 14 (2), 119-127. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.119>.

²⁶ Попович, В. В. (2009). Вплив кліматичних умов на розвиток рослинності техногенних ландшафтів Малого Полісся у зимовий період. Науковий вісник НЛТУ України, 19(3), 37-42.

²⁷ Skrobala, V., Popovych, V., Tyndyk, O., & Voloshchysyn, A. (2022). Chemical pollution peculiarities of the Nadiya mine rock dumps in the Chervonohrad Mining District, Ukraine. Mining of Mineral Deposits. 16 (4), 71-79. <https://doi.org/10.33271/mining16.04.071>.

²⁸ Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2025 року. <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/5/1/7/8/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-2025.pdf>.

враховують окуповані території²⁹. Упродовж 2025 року внаслідок пожеж на відкритих територіях загинуло 73 людини та 200 людей отримали травми. У 2024 році загинуло 42 людини і 191 людина отримала травми. На рисунку 2 наведено ранжування регіонів України за кількістю пожеж на відкритих територіях у 2025 році порівняно з 2024 роком³⁰.

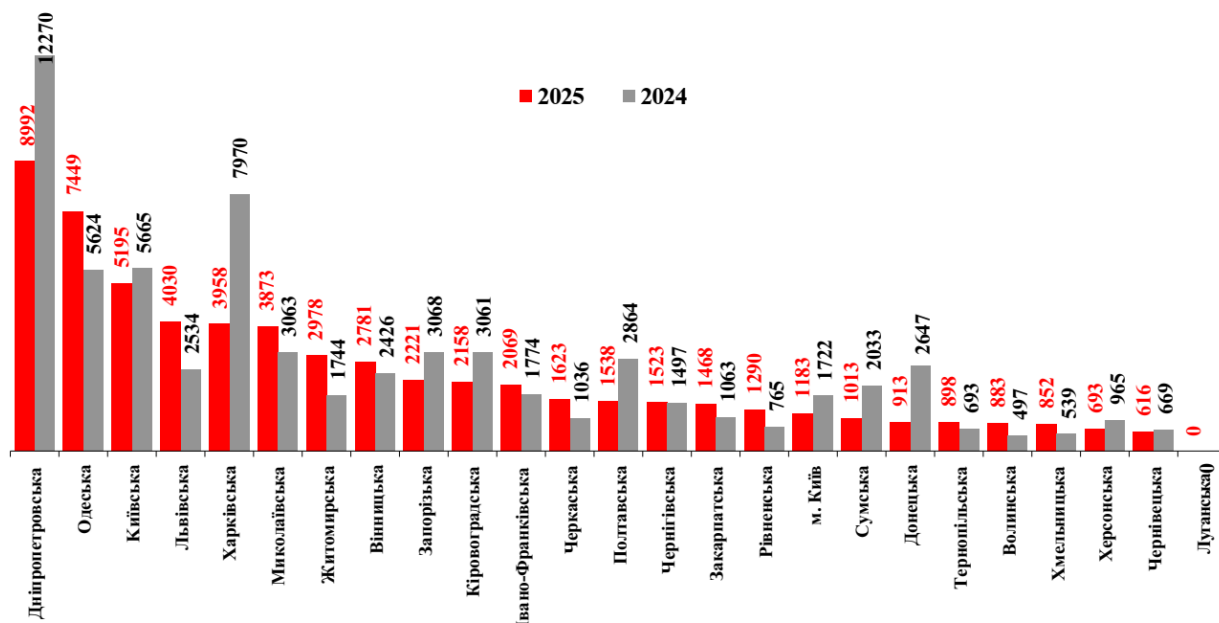


Рисунок 2. Ранжування регіонів України за кількістю пожеж на відкритих територіях у 2025 році порівняно з 2024 роком

В Україні в середньому щорічно виникає близько 3500 лісових пожеж, в результаті яких вигорає понад 5000 га лісу. У 2022 році кількість пожеж в Україні була в 1,5 рази більше порівняно з 2021 роком, а збитки становили 438,9 млн. грн. У понад 200 випадках площа пожеж займала більше ніж 5 га. Основними причинами пожеж (62 %) були загоряння в насадженнях через активні бойові дії, ракетні обстріли та снарядами, наявність вибухонебезпечних предметів³¹. За даними³² основними причинами виникнення пожеж у природних екосистемах є: необережне поводження з вогнем; порушення правил пожежної безпеки; вибухи різного роду боєприпасів; підпали; невстановлені причини; пустощі дітей з вогнем. Із настанням бойових дій причинами виникнення пожеж у природних екосистемах стали обстріли окупантів. Значна кількість пожеж, зареєстрованих підрозділами територіальних органів ДСНС України, пов'язана саме з веденням бойових дій російськими військами на території України, які призводять до потрапляння боєприпасів та їх

²⁹ Екодія. За рік в Україні сталося майже 62 тисячі пожеж у природі: збитки перевищили 2 млрд грн. <https://ecoaction.org.ua/v-ukraini-stalosia-majzhe-62000-pozhezh-u-pryrodi.html>.

³⁰ Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2025 року. <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/5/1/7/8/2/analitichna-dovidka-pro-pozhezi-2025.pdf>

³¹ Пацева, І., Барабаш, О., Мельник-Шамрай, В., & Пацева, І. (2023). Екологічна оцінка впливу пожеж у природних екосистемах на стан екологічної безпеки Житомирської області. Проблеми хімії та сталого розвитку, 3, 59–65, <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-8>

³² Сукач Р. Ю., Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б. (2024). Застосування загороджувальних смуг для локалізації та гасіння пожеж у природних екосистемах, зокрема що зазнали впливу воєнних дій. Зб. тез доп. Круглого столу “Лісові пожежі в умовах війни”, м. Львів 2024 р., 26-31. <https://sci.lubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/13939>

уламків в природні екосистеми, що спричиняє підпали різної інтенсивності³³. Слід зазначити, що значний екологічний пресинг на довкілля становлять пожежі породних відвалів вугільних шахт, сміттєзвалищ та полігонів побутових відходів³⁴. Горіння сміттєзвалищ та полігонів побутових відходів спричиняють надходження в атмосферу небезпечних хімічних сполук, продуктів неповного розпаду, пилу³⁵.

Для взаємодії під час гасіння пожеж в природних екосистемах на прикордонній території України та Польщі доцільно задіювати пожежно-рятувальні підрозділи, які розташовані в першій та другій лініях поблизу кордону Яворівського, Львівського, Самбірського та Сокальського районів Львівської області, а також Хелмського, Грубешовського та Томашувського повітів Люблінського воєводства, Бешадського, Пшемиського, Ярославського та Любашувського повітів Підкарпатського воєводства³⁶. Особливості залучення рятувальників для гасіння пожеж у природних екосистемах Львівської області наведено в дослідженнях³⁷. Розрахунок розташування пожежно-рятувальних підрозділів для гасіння пожеж у природних екосистемах відображено у роботі³⁸.

Статистика пожеж у природних екосистемах районів Закарпатської області нижче (табл. 1).

Таблиця 1

Динаміка пожеж у природних екосистемах Закарпатської області

№	Район	2019 р.	2020 р.	2021 р.	2022 р.	2023 р.	2024 р.	2025 р. (за 11 місяців)
1.	Ужгородський	691	319	395	1013	130	292	399
2.	Мукачівський	399	254	252	560	88	243	407
3.	Берегівський	272	92	106	435	41	178	133
4.	Хустський	205	158	123	366	51	134	214
5.	Тячівський	75	53	55	220	44	117	187
6.	Рахівський	30	31	20	71	9	29	51

В структурі пожеж в природних екосистемах помітне місце займають пожежі в лісах, розподіл яких у межах Закарпатської області представлено у даній таблиці (табл. 2).

Таблиця 2

Динаміка лісових пожеж Закарпатської області

№	Район	2019 р.	2020 р.	2021 р.	2022 р.	2023 р.	2024 р.	2025 р. (за 10 місяців)
1.	Ужгородський	18	4	2	23	0	0	3
2.	Мукачівський	24	44	0	10	0	1	1
3.	Берегівський	0	0	1	10	0	0	2
4.	Хустський	5	11	2	5	1	3	9
5.	Тячівський	1	2	0	6	1	1	2
6.	Рахівський	4	4	0	7	0	2	3

³³ Сукач Р. Ю., Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б. (2024). Застосування загороджувальних смуг для локалізації та гасіння пожеж у природних екосистемах, зокрема що зазнали впливу воєнних дій. 36. тез доп. Круглого столу "Лісові пожежі в умовах війни", м. Львів 2024 р., 26-31. <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/13939>

³⁴ Попович, В. В., & Кучерявий, В. П. (2012). Горіння полігонів твердих побутових відходів як загроза здоров'ю людини та фактор техногенного навантаження на довкілля. Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету, (1), 162-166.

³⁵ Попович, В. В. (2012). Пожежна небезпека стихійних сміттєзвалищ та полігонів твердих побутових відходів. Пожежна безпека, 21, 140-147.

³⁶ Товарианський, В. І., & Ренкас, А. А. (2024). Аспекти прикордонної взаємодії пожежно-рятувальних підрозділів України та країн Європейського Союзу під час ліквідації пожеж в природних екосистемах. Пожежна безпека, 44, 62-69. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.07>.

³⁷ Popovych, V., & Renkas, A. (2019). Features of landscape fires occurrence (Based on the example of Lviv region of Ukraine). Ecologia Balkanica, 11(2), 99-111.

³⁸ Renkas, A., Popovych, V., & Rudenko, D. (2022). Optimization of Fire Station Locations to Increase the Efficiency of Firefighting in Natural Ecosystems. Environmental Research, Engineering and Management, 78(1), 97-104. <https://doi.org/10.5755/j01.irem.78.1.25581>.

Одним із напрямків негативного впливу пожеж у природних екосистемах, є вплив на поверхневі природні води регіону, який сприяє високому рівню водозабезпечення України.

Закарпатська область має багатоводну гідрографічну мережу, яка включає 9429 річок і струмків, 137 озер (з яких 32 постійні водойми), а також річку Тису та її притоки, що впадає у р. Дунай, яка є найдовшою річкою в межах Європейського Союзу, протікаючи 10 країн. Регіон добре забезпечений водними ресурсами завдяки гірському розташуванню та близькості до Карпат, що робить його одним із найбагатших на воду регіонів України.

ВИСНОВКИ

Пожежі у природних екосистемах наносять значну шкоду економіці держави та добробуту населення. Із початком повномасштабного вторгнення ворога пожежі у природних екосистемах набули масштабів надзвичайних ситуацій, особливо на прифронтових територіях. На території Карпатського лісогосподарського району пожежі у природних екосистемах з кожним роком зростають, основними чинниками яких є потепління та необережне поводження із відкритим вогнем, підпал.

**ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ ПЕР- ТА
ПОЛІФТОРАЛКІЛЬНИМИ РЕЧОВИНАМИ**

**ENVIRONMENTAL RISKS OF SOIL CONTAMINATION BY PER- AND
POLYFLUOROALKYL SUBSTANCES**

Смолій Назар Ярославович, аспірант, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Smoliy146@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-7028-677X>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.05>

Анотація. Проаналізовано та узагальнено сучасні наукові дані щодо джерел надходження, поведінки та комплексних екологічних ризиків забруднення ґрунтового покриву пер- та поліфторалкільними речовинами (PFAS). Визначено, що основними джерелами антропогенного забруднення ґрунтів є викиди фторполімерних підприємств, утилізація відходів на муніципальних полігонах, атмосферне перенесення, повторне застосування осадів стічних вод й фторованих агрохімікатів у сільському господарстві. Особливу увагу приділено екологічним наслідкам застосування вогнегасних пін типу AFFF для ліквідації масштабних пожеж, що набуло критичної актуальності в Україні внаслідок збройної агресії російської федерації та систематичних обстрілів промислових об'єктів і нафтобаз. Розкрито механізми міграції та акумуляції PFAS у поверхневому шарі ґрунту, що контролюються процесами гідрофобної взаємодії з органічною речовиною, електростатичної адсорбції на мінеральних компонентах та утримання на межі розділу фаз «повітря-вода» у зоні аерації. Комплексно охарактеризовано екологічні ризики для живих компонентів екосистем. Показано негативний вплив PFAS на структуру ґрунтового мікробіоценозу та ферментативну активність. Проаналізовано вплив ксенобіотиків для вищих рослин і їх фітотоксичність. Визначено загрози для ґрунтової фауни (зокрема дощових черв'яків). Показано шляхи включення «вічних хімікатів» у наземні трофічні ланцюги та їх вимивання у підземні води. Матеріали має практичне значення для екологічного моніторингу та прийняття рішень під час рекультивації забруднених територій.

Ключові слова: вогнегасні піни AFFF, сорбція, підземні води, мікробіоценоз ґрунту, ферментативна активність ґрунту, фітотоксичність, трофічні ланцюги.

Abstract. The current scientific data on the sources of input data, behavior and complex environmental risks of soil contamination by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are analyzed and summarized. It is determined that the primary sources of anthropogenic soil contamination include emissions from the production of fluoropolymers, waste disposal in municipal landfills, atmospheric sediments and the use of biosolids from wastewater and fluorinated agrochemicals in agriculture. Special attention is paid to the environmental consequences of the use of aqueous film-forming foams (FFF) for extinguishing large-scale fires, which has become critically relevant in Ukraine due to the armed aggression of the Russian Federation and systematic shelling of industrial facilities and oil storage facilities. The mechanisms of migration and accumulation of PFAR in the upper soil layer, controlled by hydrophobic interactions with organic matter, electrostatic adsorption on mineral components, and retention at the air-water interface in the vadose zone, are revealed. The ecological risks for components of the biotic ecosystem are comprehensively characterized. The negative impact of PFAR on the structure of soil

microbiocenosis and enzymatic activity is shown. The impact of these xenobiotics on higher plants and their phytotoxicity is analyzed. Threats to soil fauna (in particular, earthworms) are determined. The ways of integration of "perpetually active chemicals" into terrestrial food chains and their leaching into groundwater are demonstrated. The materials are of practical importance for environmental monitoring and decision-making during the remediation of contaminated sites.

Keywords: aqueous film-forming foams (AFF), sorption, groundwater, soil microbiocenosis, soil enzymatic activity, phytotoxicity, food chains.

1. ВСТУП

Ґрунти зазнають впливу різних антропогенних факторів, включаючи хімічні забруднювачі. Особливу групу сучасних ксенобіотиків становлять пер- та поліфторалкільні сполуки (PFAS), які характеризуються високою хімічною, термічною та біологічною стабільністю.

Останніми роками увага міжнародної спільноти до проблеми забруднення PFAS суттєво зросла. Це пов'язано з виявленням масштабного забруднення ґрунтів і водних ресурсів у різних країнах світу, а також із підтвердженням негативного впливу цих сполук на здоров'я населення. Європейський Союз, Агентство з охорони довкілля (EPA) США та інші міжнародні організації активно розробляють нормативні обмеження щодо використання PFAS, а окремі сполуки вже включено до переліку небезпечних речовин Стокгольмської конвенції.

Через широке використання та стійкість ці хімічні речовини наявні в ґрунтах та осадових породах по всьому світу¹. Забруднення ґрунтів PFAS є екологічною проблемою, оскільки ґрунт виступає не лише депонуючим середовищем для цих сполук, але й джерелом їх подальшої міграції у підземні води, рослини та харчові ланцюги². Екологічні ризики, пов'язані із забрудненням ґрунтів PFAS, залишаються недостатньо вивченими, а їх розуміння необхідне для вирішення екологічних проблем³. Зважаючи на воєнні дії в Україні забруднення ґрунтів PFAS є особливо актуальним.

Мета цього дослідження полягала в проведенні аналізу та узагальненні сучасних наукових даних щодо екологічних ризиків забруднення ґрунтів PFAS, необхідних для проведення екологічного моніторингу та прийняття ефективних рішень з рекультиватії забруднених ґрунтів.

Для досягнення поставленої мети сформовані такі завдання:

- 1) описати основні фізико-хімічні характеристики PFAS, які впливають на їхню поведінку в ґрунті;
- 2) визначити основні джерела забруднення ґрунтів PFAS;
- 3) проаналізувати та узагальнити результати досліджень щодо поведінки PFAS у ґрунтах;
- 4) визначити екологічні ризики забруднення ґрунтів PFAS.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

В дослідженні використано комплексний методологічний підхід, що базується на поєднанні системно-екологічного й аналітико-узагальнювального аналізу сучасного масиву фундаментальних і прикладних наукових досліджень. Збір первинної наукової інформації здійснювався шляхом цілеспрямованого пошуку у провідних міжнародних реферативних базах даних ScienceDirect

¹ M. L. Brusseau, R. H. Anderson and B. Guo, 'PFAS Concentrations in Soils: Background Levels versus Contaminated Sites', *Science of the Total Environment*, vol. 740, 2020, 140017, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140017, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140017

² P. Narasimhappa, S. Singh, R. Varshney, V. Chauhan, R. Kour, P. C. Ramamurthy and N. Shehata, 'Environmental Behavior and Human Health Risks of PFAS: Occurrence, Toxicity, and State-of-the-Art Removal Approaches', *RSC Advances*, vol. 15, 2025, pp. 44555–44583, doi:10.1039/D5RA07672B

³ M. Wei, Z. Chen, K. Yang, L. Cao, C. Qiu *et al.*, 'Global Ecological and Health Risks of PFAS in Surface Soil', *Environment International*, 2025, doi:10.1016/j.envint.2025.109925

(Elsevier) та Google Scholar. Основний акцент під час формування інформаційної бази було зроблено на нещодавніх публікаціях з журналів з високим імпакт-фактором.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Загальна характеристика PFAS

PFAS визначають як речовини, що містять принаймні одну повністю фторовану метильну групу ($-\text{CF}_3$) або метиленову групу ($-\text{CF}_2-$) без будь-якого атома водню, хлору, бромово або йоду, приєднаного до неї⁴. Ці сполуки мають надзвичайно міцний зв'язок ($\text{C}-\text{F}$), який є одним із найсильніших в органічній хімії. Висока електронегативність Фтору призводить до сильної поляризації зв'язку $\text{C}-\text{F}$ (≈ 485 кДж/моль) й обумовлює інертність молекули PFAS до термічного, хімічного та біологічного розкладання. Саме тому PFAS часто називають «вічними хімікатами» (*forever chemicals*), оскільки вони здатні тривалий час зберігатися у компонентах навколишнього середовища. Якщо атоми Карбону, за винятком тих, що входять до складу функціональної групи, повністю фторовані то ці сполуки належать до перфторалکیلних речовин. Якщо ж лише частина атомів вуглецю зв'язана з фтором, такі сполуки класифікують як поліфторалкільні. У групі перфторалкілів виділяють перфторалکیلні кислоти (PFAA) серед яких важливими є перфторалкілсульфонові кислоти (PFSA) та перфторалкілкарбонові кислоти (PFCA), структурні формули яких показано на рис.1⁵.

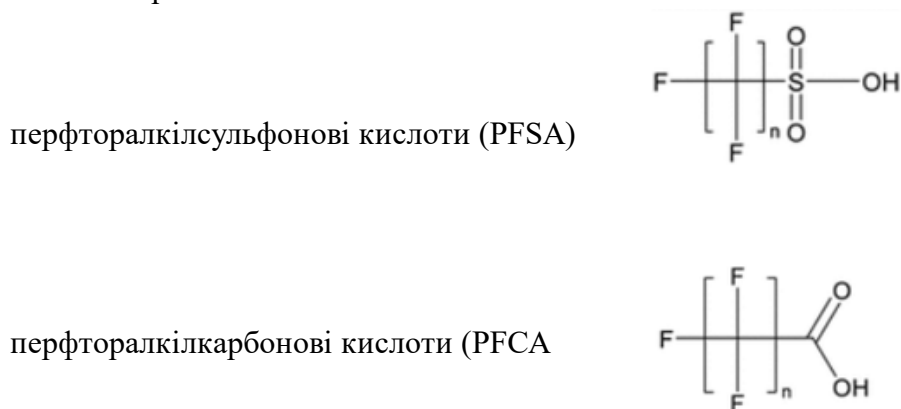


Рисунок 1. Структурні формули перфторалکیلних кислот

За довжиною карбонового ланцюга PFAA поділяють на довголанцюгові ($\text{C} \geq 8$) та коротколанцюгові сполуки ($\text{C} < 6$). Серед довголанцюгових найбільш поширені перфтороктансульфонові кислота ($\text{C}_8\text{F}_{15}\text{SO}_3-$, PFOS) та перфтороктанова кислота ($\text{C}_7\text{F}_{15}\text{COOH}$, PFOA) (рис. 2). Зараз довголанцюгові PFAS активно замінюють коротколанцюговими аналогами, проте сучасні дослідження показують, що такі сполуки також становлять суттєву екологічну загрозу через їх підвищену мобільність у ґрунтах та водному середовищі⁶.

⁴ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), *Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance* (Paris: OECD Publishing, 2021), doi:10.1787/e458e796-en

⁵ 3. B. Güzel, 'Recent Advancements on Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in the Environment for Human Health: A Comprehensive Review', *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 236, no. 526, 2025, doi:10.1007/s11270-025-08174-w

⁶ R. Napoli, F. Fazzino, F. G. A. Vagliasindi and P. P. Falciglia, 'Sustainable Remediation Strategies and Technologies of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)-Contaminated Soils: A Critical Review', *Sustainability*, vol. 17, no. 14, 2025, 6635, doi:10.3390/su17146635

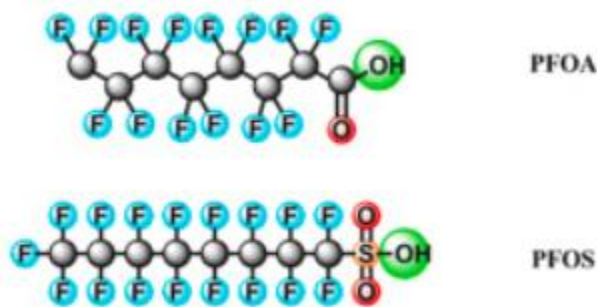


Рисунок 2. Структурні формули перфтороктанової (PFOA) та перфтороктансульфонової (PFOS) кислот

Поєднання коротких або довгих фторованих карбонових ланцюгів із полярними функціональними групами зумовлює амфіфільну природу PFAA. Гідрофобність цих сполук визначається аліфатичним ланцюгом і значною мірою залежить від його довжини: зі скороченням довжини розчинність сполук у воді зростає. Головні функціональні групи мають гідрофільні властивості⁷.

Особливу групу PFAS становлять прекурсори, які здатні трансформуватися в навколишньому середовищі або в організмах у стійкі PFAA, зокрема PFOA та PFOS. До таких речовин належать фтортеломерні спирти, поліфторалкільні фосфатні естери та інші фторовані поверхнево-активні сполуки, які широко використовуються у виробництві текстилю, пакувальних матеріалів, пожежних пін та промислових покриттів⁸.

3.2. Основні джерела забруднення ґрунтів PFAS

Забруднення ґрунтів PFAS формується під впливом як прямих (точкових і дифузних), так і опосередкованих джерел антропогенного походження.

Промислові викиди PFAS при виробництві фторполімерів належать до основних джерел локального забруднення ґрунтів. Фторполімери широко використовуються в різних секторах економіки. Дослідження свідчать, що поблизу промислових зон таких виробництв концентрації PFAS у ґрунтах значно перевищують фонові значення⁹.

Іншим потужним точковим джерелом забруднення PFAS є вогнегасні піни типу AFFF (*aqueous film-forming foam*), які використовуються для гасіння пожеж класу В, спричинених рідинами на основі вуглеводнів. PFAS у складі AFFF забезпечують стабільність піни та утворення водяної плівки між палаючим матеріалом та піною, запобігаючи повторному займанню. AFFF випускають різні виробники, а їх рецептури відрізняються складом. Використання AFFF як у звичайних тренуваннях з пожежогасіння, так і під час аварійного пожежогасіння може спричинити забруднення ґрунтів PFAS. Аномально високі рівні накопичення PFAS фіксуються в ґрунтах навколо військових баз, аеродромів та інших місць зберігання і випробування протипожежних засобів. Навіть одноразові

⁷ E. Gagliano, M. Sgroi, P. P. Falciglia, F. G. Vagliasindi and P. Roccaro, 'Removal of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFAS) from Water by Adsorption: Role of PFAS Chain Length, Effect of Organic Matter and Challenges in Adsorbent Regeneration', *Water Research*, vol. 171, 2020, 115381, doi:10.1016/j.watres.2019.115381

⁸ R. C. Buck, J. Franklin, U. Berger, J. M. Conder, I. T. Cousins, P. de Voogt, A. A. Jensen, K. Kannan, S. A. Mabury and S. P. J. van Leeuwen, 'Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins', *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 17, no. 1, 2021, pp. 9–21, doi:10.1002/ieam.4459.

⁹ A. J. Miller, K. Kleemann, J. Glüge, R. Lohmann, I. T. Cousins, D. Herzke, M. F. Miller, A. Rensmo, X. Trier, Z. Wang and M. Scheringer, 'Global Inventory of Fluoropolymer Production Plants and Their Associated PFAS Environmental Contamination', *Environmental Science & Technology*, vol. 60, no. 15, 2026, pp. 11688–11701, doi:10.1021/acs.est.5c18001.

масштабні інциденти, такі як ліквідація великих пожеж, призводять до довгострокового забруднення прилеглих територій широким спектром сполук PFAS¹⁰. В умовах воєнних дій ризики забруднення ґрунтів PFAS від використання AFFF суттєво зростають¹¹. У перші місяці збройної агресії РФ проти України через ракетні обстріли виникли масштабні пожежі на нафтобазах, складах паливно-мастильних матеріалів та промислових об'єктах, для ліквідації яких застосовували значні обсяги вогнегасних пін типу AFFF¹².

Одним із найважливіших дифузних джерел забруднення ґрунтів PFAS в агроєкосистемах є повторне використання очищених стічних вод і внесення мулових осадів у якості органічних добрив. Сучасні технології очищення стічних вод не забезпечують повного видалення PFAS. Під час технологічних процесів очищення спостерігається фазовий розподіл PFAS: коротколанцюгові сполуки переважно залишаються у водній фазі, тоді як довголанцюгові активно акумулюються в мулових осадах¹³. Використання очищених стічних вод для інтенсивного зрошення в аграрному секторі призводить до постійного штучного внесення PFAS у ґрунтові профілі. Паралельно з цим, активний мул від очищення стічних вод масово переробляється на біотверді органічні добрива завдяки високому вмісту поживних елементів. У багатьох країнах світу саме внесення осадів стічних вод розглядається як один із головних шляхів поширення PFAS у сільськогосподарських угіддях¹⁴. Додатковим джерелом забруднення сільськогосподарських ґрунтів є безпосереднє застосування фторвмісних продуктів у технологіях рослинництва. У сільському господарстві фторовані агрохімікати, демонструють посилену гербіцидну, фунгіцидну та інсектицидну активність, сприяючи покращенню захисту врожаю та врожайності. Окремі класи пестицидів та засобів захисту рослин містять компоненти PFAS, які потрапляють у ґрунт під час обробок. Наразі засоби захисту рослин ідентифіковані як значуще джерело надходження прекурсорів PFAS у підземні води країн Європи, США та Китаю¹⁵.

Важливим шляхом глобального поширення PFAS у ґрунтах є атмосферне перенесення. Леткі прекурсори PFAS можуть транспортуватися повітряними масами на великі відстані, після чого осаджуються разом із дощем, снігом або пилом. Завдяки цьому PFAS виявляються навіть у віддалених природних регіонах, де відсутні локальні джерела забруднення. Атмосферне осадження сприяє формуванню фонових концентрацій PFAS у ґрунтах і є важливим чинником їх глобального розповсюдження¹⁶.

Звалища та полігони побутових відходів є також активними вторинними джерелами поширення PFAS у довкілля. Утилізація побутових відходів, які містять PFAS (текстильні

¹⁰ M. Schüßler, C. Capitain, B. Bugsel, J. Zweigle and C. Zwiener, 'Non-Target Screening Reveals 124 PFAS at an AFFF-Impacted Field Site in Germany Specified by Novel Systematic Terminology', *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 417, no. 27, 2025, pp. 6049–6064, doi:10.1007/s00216-024-05611-3.

¹¹ Н. Я. Смолій, Н. М. Гринчишин, Екологічні ризики та наслідки використання вогнегасних пін AFFF в умовах російської збройної агресії проти України, *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*, vol. 33, 2026, pp. 83–92, <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20784643.33.2026.07>.

¹² Н. М. Гринчишин, 'Екологічні збитки внаслідок збройної агресії Російської Федерації та їх оцінювання державною екологічною інспекцією України', *Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 36, no. 2, 2026, pp. 94–101, <https://doi.org/10.36930/40360210>.

¹³ E. Tavasoli, J. L. Luek, J. P. Malley Jr. and P. J. Mouser, 'Distribution and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Wastewater Treatment Facilities', *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 23, no. 6, 2021, pp. 903–913, doi:10.1039/D1EM00032B.

¹⁴ M. I. Usman and C. Tizaoui, 'A Critical Review of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Wastewater Biosolids and Sludge', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 13, no. 6, 2025, 120422, doi:10.1016/j.jece.2025.120422.

¹⁵ H. Joerss, F. Freeling, S. van Leeuwen, J. Hollender, X. Liu, K. Nödler, Z. Wang, B. Yu, D. Zahn and G. Sigmund, 'Pesticides Can Be a Substantial Source of Trifluoroacetate (TFA) to Water Resources', *Environment International*, vol. 193, 2024, 109061, doi:10.1016/j.envint.2024.109061.

¹⁶ I. T. Cousins, J. H. Johansson, M. E. Salter, B. Sha and M. Scheringer, 'Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)', *Environmental Science & Technology*, vol. 56, no. 16, 2022, pp. 11172–11179, doi:10.1021/acs.est.2c02765.

матеріали, килимові покриття, водо- і жиростійка харчова упаковка, паперові вироби зі спеціальними просоченнями, електроніка, засоби особистої гігієни та інші товари широкого вжитку) супроводжується поступовим вивільнення цих сполук. Водорозчинні форми PFAS, які накопичуються у фільтраті, у випадку пошкодження протифільтраційних екранів створюють пряму загрозу для прилеглих ґрунтів. Водночас леткі сполуки-прекурсори, як фтортеломерні спирти, дифундують у звалищний газ та за відсутності систем дегазації потрапляють в атмосферу. В атмосферному повітрі ці речовини трансформуються і повертаються в ґрунт шляхом сухого та вологого осадження. Окрім того, анаеробні умови всередині полігонів стимулюють як абіотичні (термічні), так і біотичні (мікробні) процеси перетворення складних прекурсорів у стабільні форми PFAS¹⁷. Такі різні шляхи міграції зумовлюють високі концентрації PFAS у ґрунтах навколо звалищ. Зважаючи на те, що полігони часто межують із землями сільськогосподарського призначення, виникають суттєві ризики для трофічних ланцюгів. Зокрема, доведено факти значного накопичення PFAS у плодоовочевій продукції (на прикладі капусти), вирощеній у радіусі до 5 км від звалища, із піковими концентраціями в межах 1,5 км¹⁸.

3.3. Поведінка PFAS у ґрунті

Сорбція є основним процесом, що контролює міграцію та просторовий розподіл PFAS у ґрунтовому профілі. Завдяки наявності як гідрофобних, так і гідрофільних фрагментів в одній молекулярній структурі, PFAS можуть взаємодіяти з різними компонентами ґрунту та можуть бути іммобілізовані шляхом гідрофобної або електростатичної взаємодії¹⁹.

Гідрофобна взаємодія PFAS пов'язана з органічною речовиною ґрунту. Під час цього процесу неполярні фторовані хвости молекул PFAS відштовхуються від водної фази ґрунтового розчину і взаємодіють з гідрофобними ділянками органічної речовини ґрунту (гуміновими та фульвокислотами, нерозчинним органічним вуглецем ґрунту). Ефективність цього процесу прямо пропорційна довжині фторованого карбонового ланцюга сполуки: довголанцюгові сполуки демонструють вищу спорідненість до органічної речовини ґрунту, натомість коротколанцюгові PFAS характеризуються слабшою сорбцією²⁰. Зростання вмісту органічного вуглецю корелює зі зменшенням вертикальної міграції PFAS і підвищенням їх акумуляції у верхніх горизонтах ґрунту²¹.

Електростатичні (іонні) взаємодії відбуваються між основними функціональними групами PFAS та мінеральними компонентами ґрунту. В багатих на мінерали ґрунтах, аніонні та катіонні PFAS адсорбуються на протилежно заряджених мінеральних поверхнях. Ця адсорбція регулюється рН ґрунту. За типових для більшості ґрунтів значень рН, PFCA та PFSA перебувають у повністю дисоційованій (аніонній) формі. В таких умовах головні групи молекул PFAS здатні електростатично притягуватися до позитивно заряджених поверхонь ґрунтових мінералів – оксидів

¹⁷ T. Tolaymat, N. Robey, M. Krause, J. Larson, K. Weitz, S. Parvathikar, L. Phelps, W. Linak, S. Burden, T. Speth and J. Krug, 'A Critical Review of PFAS Landfill Disposal in the United States', *Science of the Total Environment*, vol. 905, 2023, 167185, doi:10.1016/j.scitotenv.2023.167185.

¹⁸ Huang, X., Wei, X., Liu, H., Li, W., Shi, D., Qian, S. *et al.*, 'Occurrence of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Municipal Solid Waste Landfill Leachates from Western China', *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 46, 2022, pp. 69588–69598, doi:10.1007/s11356-022-20754-5.

¹⁹ B. Xu, S. Liu, J. L. Zhou, C. Zheng, W. Jin, B. Chen, T. Zhang and W. Qiu, 'PFAS and Their Substitutes in Groundwater: Occurrence, Transformation and Remediation', *Journal of Hazardous Materials*, vol. 412, 2021, 125159, doi:10.1016/j.jhazmat.2021.125159.

²⁰ S. Hazrati, J. Kumpiene, T. Leiviskä, T., and Carabante, I., 'Reciprocal Influence of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) and Soil Organic Matter on Their Fate in Soils', *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 32, 2025, pp. 23265–23277, doi: 10.1007/s11356-025-37024-9.

²¹ A. Dhulia, C. Abou-Khalil, J. Kewalramani, D. Sarkar and M. C. Boufadel, 'Mobilization of Per- and Poly-Fluoroalkyl Substances (PFAS) in Soils with Different Organic Matter Contents', *Chemosphere*, vol. 361, 2024, 142503, doi:10.1016/j.chemosphere.2024.

та гідроксидів заліза, алюмінію та марганцю. Електростатична адсорбція може виступати важливим механізмом утримання коротколанцюгових PFAS у ґрунтах²².

Адсорбційна здатність PFAS на межі тверда фаза-вода впливає на їх міграцію та накопичення. Оскільки PFAS є поверхнево-активними речовинами (ПАР), за умов неповної вологоємності ґрунту (у зоні аерації) значна частина молекул концентрується на межі розділу між ґрунтовою вологою та повітряними порами. Це створює додатковий резервуар затримки забруднювачів. Загалом, основні фактори, що впливають на адсорбцію на цій межі, можна згрупувати у дві категорії: властивості молекули PFAS та фізико-хімічні властивості ґрунту.

Адсорбційні властивості PFAS залежать від довжини карбонового ланцюга та типу основної функціональної групи. Довголанцюгові сполуки демонструють вищу спорідненість до органічної речовини ґрунту, що зумовлено гідрофобними взаємодіями. Вони міцно утримуються у верхніх гумусових горизонтах ґрунту і мігрують повільно. Натомість коротколанцюгові PFAS характеризуються слабшою сорбцією і, відповідно, більшою мобільністю у ґрунтовому профілі. Вони швидко вимиваються атмосферними опадами у глибші шари і досягають ґрунтових вод за короткі проміжки часу. За однакової кількості атомів карбону перфторсульфонати (PFSA) сорбуються сильніше, ніж перфторкарбонати (PFCA), що зумовлено більшим розміром та вищою щільністю заряду сульфонатної групи²³.

Основними фізико-хімічними властивостями ґрунту, що впливають на сорбційну здатність PFAS, є вміст органічної речовини, рН ґрунтового розчину та гранулометричний склад.

Вміст органічного вуглецю є головним чинником, що лімітує рухливість довголанцюгових сполук. У піщаних ґрунтах із низьким вмістом гумусу міграція всіх класів PFAS відбувається майже безперешкодно.

Зниження рН ґрунтового розчину призводить до протонування оксидів заліза та алюмінію, збільшуючи позитивний заряд поверхні мінералів, що сприяє посиленню сорбції аніонних форм PFAS. У нейтральних та лужних ґрунтах, навпаки, сорбція послаблюється й спостерігається зростання рухливості цих сполук, що збільшує ризик їх вимивання у підземні води²⁴. Крім того, рН впливає на мікробіологічну активність ґрунту та процеси трансформації окремих попередників PFAS. Хоча більшість PFAS є стійкими до біологічного розкладу, деякі прекурсори можуть трансформуватися у більш стабільні сполуки залежно від кислотно-лужних умов середовища²⁵.

Гранулометричний склад ґрунту визначає площу поверхні мінеральних частинок, пористість і водопроникність ґрунтового середовища, що безпосередньо впливає на міграцію PFAS. Ґрунти з високим вмістом глинистих і пилуватих фракцій характеризуються більшою сорбційною здатністю порівняно з піщаними ґрунтами. Глинисті мінерали мають значну питому поверхню та високу катіонно-обмінну здатність, завдяки чому здатні ефективніше утримувати PFAS. Особливе значення гранулометричний склад має для поширення коротколанцюгових PFAS, які є більш

²² P. Kumar, A. Sharma and R. Singh, 'A Critical Review on Occurrence, Speciation, Mobilization, and Toxicity of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in the Soil-Microbe-Plant System and Bioremediation Strategies', *Journal of Hazardous Materials*, vol. 494, 2025, 138743, doi:10.1016/j.jhazmat.2025.138743.

²³ M. Han, C. Qin and Y. Gao, 'Sources and Transport of Per- and Polyfluoroalkyl Substance (PFAS) in Agricultural Soil-Plant Systems', *New Contaminants*, vol. 1, 2025, e005, doi:10.48130/newcontam-0025-0007.

²⁴ M. L. Brusseau, 'Differential Sorption of Short-Chain versus Long-Chain Anionic Per- and Polyfluoroalkyl Substances by Soils', *Environments*, vol. 10, no. 10, 2023, 175, doi:10.3390/environments10100175.

²⁵ X. Li, Y. Zhao, H. Wang and J. Chen, 'Occurrence, Fate, and Remediation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Soils: A Review', *Current Opinion in Environmental Science & Health*, vol. 34, 2023, 100487, doi:10.1016/j.coesh.2023.100487.

мобільними та менш схильними до сорбції. У легких піщаних ґрунтах вони можуть швидко мігрувати на значні глибини, створюючи ризики забруднення водоносних горизонтів²⁶.

Встановлено вплив PFAS на формування водостійких агрегатів ґрунту, що може впливати на фізичні властивості ґрунтів і зниження їх родючості²⁷.

Таким чином, поведінка PFAS у ґрунті є складною та визначається комплексом взаємодій. Розуміння цих процесів є необхідною умовою для оцінки екологічних ризиків.

3.4. Екологічні ризики забруднення ґрунтів PFAS

3.4.1. Ризики для ґрунтової мікробіоти та ферментативної активності

PFAS впливають на видовий склад і різноманіття мікроорганізмів. За умов тривалого забруднення ґрунтів PFAS спостерігається зменшення мікробного біорізноманіття та зміна домінуючих таксонів у ґрунті. Встановлено, що ступінь негативного впливу залежить від довжини карбонового ланцюга й функціональної групи PFAS та фізико-хімічних властивостей ґрунту. Зокрема, сполуки із довшим ланцюгом та сульфонатною групою характеризуються вищою токсичністю щодо ґрунтових мікроорганізмів²⁸. Найбільш чутливими до впливу PFAS є бактеріальні спільноти, тоді як грибні організми часто демонструють вищу стійкість до забруднення²⁹.

Ґрунтові ферменти беруть участь у біохімічних реакціях, пов'язаних з кругообігом поживних речовин та розкладанням органічних сполук, включаючи детоксикацію ксенобіотиків. Активність ферментів дуже чутлива до забруднення. Дослідження показують, що PFAS здатні пригнічувати активність ґрунтових ферментів, зокрема уреаз, лужної фосфатази та дегідрогенази, які є важливими індикаторами біологічної активності ґрунту. Внаслідок цього сповільнюються процеси розкладання органічних речовин і порушується трансформація поживних елементів³⁰.

3.4.2. Ризики для вищих рослин і фітотоксичність

Особливий екологічний ризик забруднення ґрунтів PFAS пов'язаний із їх здатністю накопичуватися в рослинах. Розчинені у ґрунті PFAS поглинаються корінням рослин. Механізми поглинання ксенобіотиків рослинами регулюється довжиною карбонового ланцюга. Коротколанцюгові PFAS через високу водорозчинність та слабку сорбцію ґрунтом легко поглинаються корінням і разом із водою пасивно транспортуються ксилемою в надземну частину рослин – листя, стебла, плоди та зерно. Довголанцюгові PFAS міцно зв'язуються з ліпідами та білками кореневої системи, тому їх транслокація у вегетативні органи є обмеженою, проте вони викликають локальні ураження корневих тканин. Акумуляція PFAS у сільськогосподарських культурах створює прямі ризики для здоров'я людини через харчові ланцюги³¹.

PFAS рідко призводять до очевидних фенотипових/фізіологічних пошкоджень у рослин, але помітно порушують деякі біологічні процеси на біохімічному та молекулярному рівнях. Вплив ПФАР індукує надмірне утворення активних форм кисню і додатково пошкоджує структуру

²⁶ K. Rankin, S. A. Mabury, T. M. Jenkins and J. W. Washington, 'A North American and Global Survey of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils: Distribution Patterns and Mode of Occurrence', *Chemosphere*, vol. 264, 2021, 128453, doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128453

²⁷ B. Xu, G. Yang, A. Lehmann, S. Riedel and M. C. Rillig, 'Effects of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) on Soil Structure and Function', *Soil Ecology Letters*, vol. 5, no. 1, 2022, pp. 108–117, doi:10.1007/s42832-022-0143-5.

²⁸ Y. Cai, H. Chen, R. Yuan, F. Wang, Z. Chen and B. Zhou, 'Toxicity of Perfluorinated Compounds to Soil Microbial Activity: Effect of Carbon Chain Length, Functional Group and Soil Properties', *Science of the Total Environment*, vol. 690, 2019, pp. 1162–1169, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.440.

²⁹ C. Samarasinghe, M. M. Bahar, F. Qi, K. Yan, Y. Liu and R. Naidu, 'Evaluating PFHxS Toxicity to Invertebrates and Microbial Processes in Soil', *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, vol. 5, 2023, pp. 120–128, doi:10.1016/j.enceco.2023.03.003.

³⁰ Y. Wang, Y. Li, G. Zhao and L. Chen, 'Effect of Perfluorooctanoic Acid on Microbial Activity in Wheat Soil under Different Fertilization Conditions', *Environmental Pollution*, vol. 264, 2020, 114784, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114784

³¹ M. Han, C. Qin and Y. Gao, 'Sources and Transport of Per- and Polyfluoroalkyl Substance (PFAS) in Agricultural Soil-Plant Systems', *New Contaminants*, vol. 1, 2025, article e005, doi:10.48130/newcontam-0025-0007.

рослинних клітин та функції органел. Порушується ряд біохімічних процесів у рослинних клітинах, таких як фотосинтез, експресія генів, синтез білка, вуглецевий та азотний метаболізм³².

3.4.3. Ризики для ґрунтових безхребетних

Серед ґрунтових безхребетних особливо чутливими до впливу PFAS є дощові черв'яки, які виконують важливі функції у процесах ґрунтоутворення, розкладу органічної речовини та кругообігу поживних елементів. Дослідження свідчать, що накопичення PFAS у ґрунті може негативно впливати на виживання, ріст, репродуктивну функцію та метаболічну активність цих організмів. Зокрема, вплив PFOS та PFOA асоціюється зі зниженням приросту біомаси дощових черв'яків, порушенням репродуктивних процесів, підвищенням рівня оксидативного стресу та змінами активності антиоксидантних ферментів. Встановлено також, що високі концентрації PFAS можуть спричиняти пошкодження ДНК, порушення енергетичного обміну та метаболічних процесів у тканинах безхребетних. Такі зміни можуть мати суттєві екологічні наслідки, оскільки погіршення стану ґрунтової фауни призводить до зниження біологічної активності ґрунту, порушення трофічних зв'язків та погіршення функціонування ґрунтових екосистем загалом³³.

3.4.4. Ризики включення в наземні харчові ланцюги

PFAS поглинаються рослинами з ґрунту та біоакумулюються в різних органах. Подальше споживання забруднених рослин травоядними тваринами сприяє перенесенню цих сполук на вищі трофічні рівні, де відбувається їх накопичення в тканинах організмів. Дослідження свідчать, що коротколанцюгові PFAS характеризуються високою рухливістю у системі «ґрунт–рослина», тоді як довголанцюгові сполуки більшою мірою акумулюються в коренях рослин та організмах тварин. Надходження PFAS до харчових продуктів рослинного і тваринного походження створює потенційні ризики для здоров'я людини. У зв'язку з цим міграція PFAS у наземних харчових ланцюгах розглядається як один із ключових шляхів довготривалого впливу цих забруднювачів на екосистеми та здоров'я населення³⁴.

3.4.5. Ризики вторинного забруднення гідросфери

ґрунт рідко виступає кінцевим депо PFAS; частіше він виконує роль довготривалого джерела емісії. Через атмосферні опади або штучне зрошення відбувається вимивання PFAS у глибші горизонти. Особливо високий ризик вимивання характерний для легких піщаних ґрунтів із низьким вмістом гумусу, де гідрофобне утримування молекул мінімальне. Потрапляючи у водоносні горизонти PFAS формують шлейфи забруднення підземних вод, які можуть поширюватися на кілометри від первинного джерела, створюючи масштабну загрозу для джерел питного водопостачання і водних екосистем.

4. ВИСНОВКИ

Проведено комплексне теоретичне узагальнення екологічних ризиків, пов'язаних із забрудненням ґрунтів PFAS. За результатами дослідження сформульовано такі висновки:

1. Виняткова стабільність PFAS зумовлена міцністю зв'язку карбон–фтор. Амфіфільність молекул визначає подвійну поведінку: гідрофобний ланцюг забезпечує сорбцію ґрунтом, а

³² J. Li, J. Sun and P. Li, 'Exposure Routes, Bioaccumulation and Toxic Effects of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) on Plants: A Critical Review', *Environment International*, vol. 158, 2022, article 106891, doi:10.1016/j.envint.2021.106891.

³³ M. Delor, L. Mamy, C. Bedos, P. Benoit and J. Barrere, 'Exposure of Earthworms to Perfluoroalkyl Substances (PFAS): Effects on Growth, Reproduction and Oxidative Stress', *Environmental Pollution*, vol. 335, 2023, article 122357, doi:10.1016/j.envpol.2023.122357.

³⁴ G. Jha, V. Kankarla, E. McLennon, S. Pal, D. Sih, B. Dari, D. Diaz and M. Nocco, 'Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Integrated Crop–Livestock Systems: Environmental Exposure and Human Health Risks', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 23, 2021, article 12550, doi:10.3390/ijerph182312550

гідрофільна група – розчинність у воді. Сучасні коротколанцюгові замінники є менш біоаккумулятивними, але значно мобільнішими, що прискорює їх поширення.

2. Основними точковими джерелами забруднення ґрунтів PFAS є викиди фторполімерних підприємств та застосування вогнегасних пін типу AFFF. Дифузне забруднення формується через внесення біоосадів стічних вод, використання фторованих пестицидів, атмосферне перенесення та фільтрати сміттєзвалищ.

3. Вертикальний рух PFAS контролюється сорбційними процесами. Довголанцюгові сполуки міцно зв'язуються з органічною речовиною у верхніх горизонтах. Коротколанцюгові фракції утримуються переважно через електростатичну адсорбцію на мінералах та на межі розділу «повітря-вода» в зоні аерації. Піщані ґрунти з низьким вмістом органіки сприяють швидкому вимиванню PFAS у підземні води.

4. Забруднення ґрунту PFAS чинить багатовекторний деструктивний вплив, зокрема впливає на мікробіоценози, пригнічує ферментативну активність, поглинається вищими рослинами та біоакмулюється в різних органах, негативно впливає на ґрунтову мезофауну. Водночас едафотоп функціонує як довготривале джерело емісії «вічних хімікатів», що призводить до формування стійких шлейфів забруднення підземних вод гідросфери та забезпечує безперешкодне надходження токсикантів у трофічні ланцюги за схемою «ґрунт–рослина/тварина–людина».

Результати дослідження є основою для вдосконалення екологічного моніторингу, розробки заходів рекультивації забруднених територій в Україні.

ВПЛИВ ПОГІРШЕННЯ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ ТА ЗМІНИ КЛІМАТУ НА ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ

THE IMPACT OF ENVIRONMENTAL DEGRADATION AND CLIMATE CHANGE ON ENVIRONMENTAL SECURITY

Хондак Інна Іванівна, к. т. н., доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, inna.hondak@nure.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6644-9968>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.06>

Анотація. У статті досліджено вплив погіршення стану довкілля та глобальних кліматичних змін на екологічну безпеку України в умовах сучасних викликів, зокрема воєнних дій. Розглянуто основні чинники забруднення атмосферного повітря, серед яких провідне місце займають антропогенні навантаження, інтенсивний розвиток промисловості та нераціональне використання природних ресурсів. Проаналізовано динаміку викидів парникових газів від стаціонарних джерел в Україні із урахуванням впливу військових дій. Визначено основні галузі-забруднювачі та тенденції їх змін. Встановлено, що найбільший внесок у формування викидів здійснюють енергетичний сектор та переробна промисловість, тоді як інші види економічної діяльності мають значно менший вплив. Проведено порівняльний аналіз тенденцій викидів парникових газів із країнами Європейського Союзу, що дозволило виявити відмінності у динаміці скорочення викидів та ефективності екологічної політики. Обґрунтовано, що в умовах війни спостерігається нестабільність екологічних показників, яка зумовлена як економічними, так і інфраструктурними факторами. Визначено, що зміна клімату посилює негативні процеси деградації довкілля та створює додаткові ризики для сталого розвитку держави. Доведено необхідність впровадження комплексного підходу до забезпечення екологічної безпеки, який включає модернізацію енергетичного сектору, розвиток системи моніторингу викидів та гармонізацію екологічної політики з європейськими стандартами. Отримані результати можуть бути використані для формування ефективних управлінських рішень у сфері екологічної безпеки та кліматичної політики України.

Ключові слова: екологічна безпека, зміна клімату, викиди парникових газів, забруднення атмосферного повітря, енергетика, промисловість, війна в Україні, сталий розвиток, декарбонізація.

Abstract. The article examines the impact of environmental degradation and global climate change on the ecological security of Ukraine in the context of modern challenges, in particular military operations. The main factors of atmospheric air pollution are considered, among which anthropogenic loads, intensive industrial development and irrational use of natural resources occupy a leading place. The dynamics of greenhouse gas emissions from stationary sources in Ukraine are analyzed, taking into account the impact of military operations. The main polluting industries and trends in their changes are identified. It is established that the energy sector and the processing industry make the greatest contribution to the formation of emissions, while other types of economic activity have a much smaller impact. A comparative analysis of greenhouse gas emission trends with the countries of the European Union is carried out, which made it possible to identify differences in the dynamics of emission reduction and the effectiveness of environmental policy. It is substantiated that in wartime conditions, instability of environmental indicators

is observed, which is due to both economic and infrastructural factors. It is determined that climate change intensifies the negative processes of environmental degradation and creates additional risks for the sustainable development of the state. The need for the implementation of a comprehensive approach to ensuring environmental security is proven, which includes the modernization of the energy sector, the development of an emissions monitoring system and the harmonization of environmental policy with European standards. The results obtained can be used to form effective management decisions in the field of environmental security and climate policy of Ukraine.

Keywords: environmental security, climate change, greenhouse gas emissions, air pollution, energy, industry, war in Ukraine, sustainable development, decarbonization.

1. ВСТУП

Погіршення стану довкілля та зміна клімату є одними з найгостріших глобальних викликів сучасності, що суттєво впливають на стабільність природних екосистем і умови життєдіяльності людини. Інтенсивний розвиток промисловості, зростання антропогенного навантаження, нераціональне використання природних ресурсів і накопичення забруднюючих речовин у навколишньому середовищі призводять до поступової деградації екосистем і порушення їх здатності до самовідновлення. Водночас кліматичні зміни, що проявляються у підвищенні середньорічних температур, збільшенні частоти екстремальних погодних явищ і зміні гідрологічного режиму, посилюють негативні тенденції та формують нові виклики для довкілля. Зміна клімату може завадити довгостроковому економічному зростанню та підвищити ризики для безпеки життєдіяльності людини на глобальному рівні¹.

У сучасних умовах екологічна проблематика виходить за межі традиційного розуміння охорони навколишнього середовища та набуває характеру складової безпеки. Погіршення якості атмосферного повітря, деградація ґрунтів, виснаження водних ресурсів і втрата біорізноманіття створюють комплексні загрози, що мають довгострокові наслідки для розвитку суспільства.

Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах військових дій на території України, які спричиняють додаткове техногенне навантаження, руйнування інфраструктури та порушення природних екосистем. Під час вибуху бомби чи ракети в повітря вивільняється багато отруйних хімічних речовин: чадний газ, бурий газ, діоксид азоту, формальдегід тощо. Під час вибуху всі речовини проходять повне окиснення, а продукти хімічної реакції вивільняються в атмосферу і забруднюють її². У таких умовах екологічна безпека стає складовою національної безпеки держави³.

В умовах стрімкого загострення глобальних екологічних проблем питання забезпечення екологічної безпеки набуває особливої значущості як на світовому, так і на національному рівнях. Погіршення стану довкілля, зростання обсягів викидів парникових газів та інтенсифікація кліматичних змін формують комплекс взаємопов'язаних загроз, що впливають на стійкість природних екосистем, економічний розвиток і якість життя населення. Кумулятивний характер накопичення парникових газів зумовлює довготривалі та відкладені наслідки, які значно ускладнюють процеси прогнозування та управління екологічними ризиками.

¹ IPCC. Зміна клімату 2021: Основи фізичної науки. Внесок Робочої групи I до Шостого звіту про оцінку Міжурядової групи експертів зі зміни клімату / за ред. В.Массон-Делмотт та ін. Cambridge: Cambridge University Press, 2021

² Хондак І.І., Березуцька Н.Л. Аналіз екологічної ситуації в Україні після початку військових дій. Наука і техніка сьогодні. Серія: «Техніка». № 4 (18). 2023. С. 266 – 279.

³ Цибульська П. Екологічна безпека як ключовий елемент національної політики. <URL: <https://uwecworkgroup.info/uk/environmental-security-a-key-element-of-ukraines-national-policy/> > дата звернення: 5 травня 2026.

Особливої актуальності ця проблема набуває для України, яка перебуває в умовах повномасштабної війни. Воєнні дії спричиняють масштабне техногенне навантаження на навколишнє середовище, включаючи руйнування промислових об'єктів, енергетичної інфраструктури, забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і водних ресурсів. Це не лише погіршує екологічний стан територій, але й створює додаткові загрози для екологічної безпеки держави, посилюючи негативний вплив кліматичних змін.

Водночас Україна, як учасник міжнародних кліматичних угод та суб'єкт євроінтеграційних процесів, зобов'язана впроваджувати сучасні механізми регулювання викидів парникових газів, зокрема систему моніторингу, звітності та верифікації (МЗВ), а також адаптувати національну політику до вимог Європейського Союзу. Це потребує ґрунтовного наукового аналізу сучасного стану викидів, визначення ключових джерел забруднення та оцінки тенденцій їх змін.

Крім того, зміна клімату безпосередньо впливає на продовольчу безпеку, водні ресурси, енергетичний сектор та соціальну стабільність, що в сукупності формує новий спектр викликів для державного управління. Зростання частоти екстремальних погодних явищ, зниження врожайності сільськогосподарських культур, деградація земель і ризики кліматичної міграції вимагають розроблення ефективних адаптаційних стратегій.

Таким чином, актуальність цього дослідження зумовлена необхідністю комплексного аналізу впливу деградації довкілля та кліматичних змін на екологічну безпеку України, особливо в умовах воєнного стану, а також потребою у формуванні науково обґрунтованих підходів до зниження екологічних ризиків і забезпечення сталого розвитку держави.

Правові засади участі України у міжнародній кліматичній політиці були закладені шляхом ратифікації Рамкової конвенції ООН про зміну клімату відповідно до Закону України від 29.10.1996 № 435/96-ВР⁴⁵. Наступним важливим етапом стала ратифікація Кіотського протоколу до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату, здійснена Законом України від 04.02.2004 № 1430-IV. Після набуття ним чинності 16.02.2005 Україна взяла на себе зобов'язання забезпечити у період 2008–2012 років утримання обсягів антропогенних викидів парникових газів на рівні, що не перевищує показники 1990 року.

У подальшому розвиток державної кліматичної політики був продовжений через ухвалення урядових стратегічних документів. Зокрема, розпорядженням Кабінету Міністрів України від 07.12.2016 № 932-р схвалено Концепцію реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року, а також затверджено план заходів з її виконання розпорядженням від 06.12.2017 № 878-р⁶.

Важливим етапом інтеграції України до європейського екологічного простору стало підписання Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, ратифікованої Законом України № 1678-VII від 16.09.2014 та чинної з 01.09.2017⁷. У межах цієї угоди Україна взяла на себе зобов'язання щодо гармонізації національного законодавства з положеннями Директиви 2003/87/ЄС від 13.10.2003, яка регламентує функціонування системи торгівлі квотами на викиди

⁴ Кірейцева Г., Хоменко С. Впровадження системи моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів як інструмент євроінтеграції України. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 1/2025 (150). Серія: Екологія. С. 81-91. <URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.10> > дата звернення: 15 травня 2026.

⁵ Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату : міжнар. док. від 09.05.1992. <URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_044 > дата звернення: 1 травня 2026.

⁶ Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 07.12.2016 р. № 932-р. <URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/932-2016-p> > дата звернення: 1 травня 2026.

⁷ Про ратифікацію Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом : Закон України від 16.09.2014 р. № 1678-VII. <URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1678-18> > дата звернення: 6 травня 2026

парникових газів у межах Європейського Союзу. З метою впровадження в Україні системи моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів було прийнято Закон України від 12.12.2019 № 377-IX «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів», який визначає правові та організаційні основи функціонування відповідної системи та гармонізації національних підходів із міжнародними вимогами у сфері кліматичної політики⁸.

Важливим напрямом у цьому контексті є гармонізація національного законодавства з європейськими вимогами, зокрема впровадження системи моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів, яка забезпечує контроль за їх обсягами та сприяє формуванню ефективної кліматичної політики. Система МЗВ (моніторинг, звітність, верифікація викидів парникових газів промисловими підприємствами) є комплексним механізмом, що забезпечує виконання міжнародних зобов'язань України в межах кліматичної політики. Впровадження цієї системи є критично важливим елементом євроінтеграційного процесу, особливо в контексті виконання вимог Угоди про асоціацію з ЄС та механізму системи торгівлі квотами на викиди парникових газів⁹.

Однак, незважаючи на створену нормативно-правову базу, питання зниження викидів та забезпечення екологічної безпеки залишаються актуальними, що зумовлено високою енергоємністю економіки та домінуванням енергетичного сектору у структурі викидів.

Проблема ускладнюється глобальними кліматичними змінами, які характеризуються підвищенням температури повітря, зміною режиму опадів та зростанням частоти екстремальних погодних явищ. За прогнозами, до кінця XXI століття середньорічна температура може зрости на 3–6 °С, що призведе до суттєвих негативних наслідків, зокрема зниження врожайності сільськогосподарських культур, дефіциту водних ресурсів і погіршення умов життєдіяльності населення. Зокрема, підвищення температури на 2 °С може спричинити падіння врожайності більш ніж на 20 %, а подальше потепління – зробити неможливим вирощування окремих культур у традиційних регіонах.

Крім того, зміни клімату супроводжуються трансформацією гідрологічного режиму, що проявляється у збільшенні кількості опадів у зимово-весняний період та їх зменшенні влітку й восени, а також зниженням рівня зволоження територій. Це створює додаткові ризики для сільського господарства та водної безпеки. Водночас Україна вже перебуває під впливом глобального потепління, що потребує адаптації економіки, зокрема зміни структури сільськогосподарського виробництва.

2. МЕТОДОЛОГІЯ

Метою дослідження є комплексний аналіз впливу погіршення стану довкілля та зміни клімату на екологічну безпеку України, виявлення основних джерел і тенденцій викидів парникових газів, а також обґрунтування напрямів підвищення екологічної стійкості в умовах воєнних і кліматичних викликів.

3. РЕЗУЛЬТАТИ

В Кіотському протоколі зазначено, що найбільше впливають на зміну клімату такі парникові гази: вуглекислий газ (CO₂), метан (CH₄), та закис азоту (N₂O)¹⁰. Викиди CH₄ є другими за величиною після CO₂, якщо враховувати їхню частку в загальних викидах парникових газів.

⁸ Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів: Закон України від 12.12.2019 р. № 377-IX. <URL <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/377-20> > дата звернення: 14 травня 2026

⁹ Те ж саме, що ⁴.

¹⁰ Кіотський протокол до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату: міжнар. док. від 11.12.1997. <URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801 > дата звернення: 15 травня 2026.

На рисунку 1 представлені діаграми викидів вуглекислого газу до війни і під час війни від стаціонарних джерел в Україні¹¹.

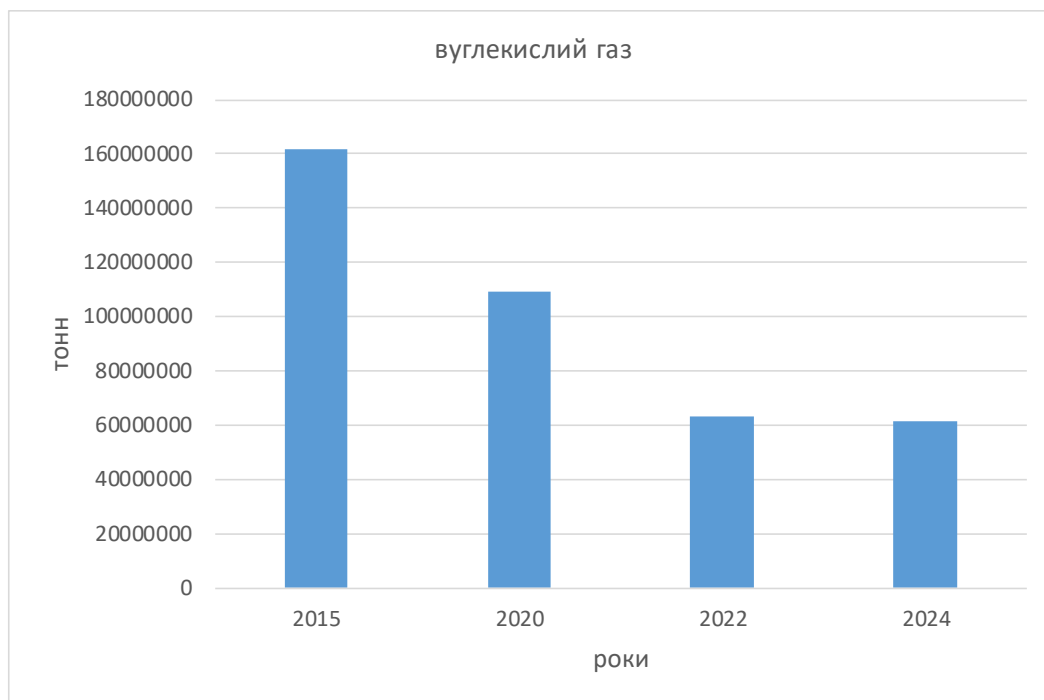


Рисунок 1. Викиди вуглекислого газу в Україні від стаціонарних джерел

На рисунку 1 представлено динаміку викидів вуглекислого газу (CO_2) в Україні від стаціонарних джерел за 2015, 2020 та 2022–2024 роки, що дозволяє простежити як довгострокові тенденції, так і вплив воєнних факторів.

У довоєнний період (2015–2020 рр.) спостерігається стійка тенденція до зниження викидів CO_2 . Це пов'язано з підвищенням енергоефективності та частковою модернізацією енергетичного сектору.

Починаючи з 2022 року, динаміка викидів суттєво змінюється під впливом воєнних дій. У 2022 році відбулося різке зниження викидів, що зумовлено зупинкою значної частини підприємств, руйнуванням інфраструктури та скороченням економічної активності. У 2023 році спостерігається часткове відновлення викидів, що пов'язано з адаптацією економіки та відновленням роботи окремих галузей. Водночас у 2024 році знову фіксується зниження, спричинене новими ударами по енергетичній інфраструктурі та нестабільною роботою промислового сектору.

Таким чином, у довгостроковій перспективі простежується тенденція до зменшення викидів, однак у воєнний період вона набуває нестабільного характеру, що свідчить про визначальну роль економічних та інфраструктурних факторів у формуванні рівня викидів CO_2 .

На рисунку 2 представлені діаграми викидів метану, оксиду азоту та діоксиду азоту в Україні від стаціонарних джерел до війни і під час війни¹⁰.

¹¹ <URL:https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2014/ns_rik/ns_u/vosr_u2015.html> дата звернення: 5 травня 2026.

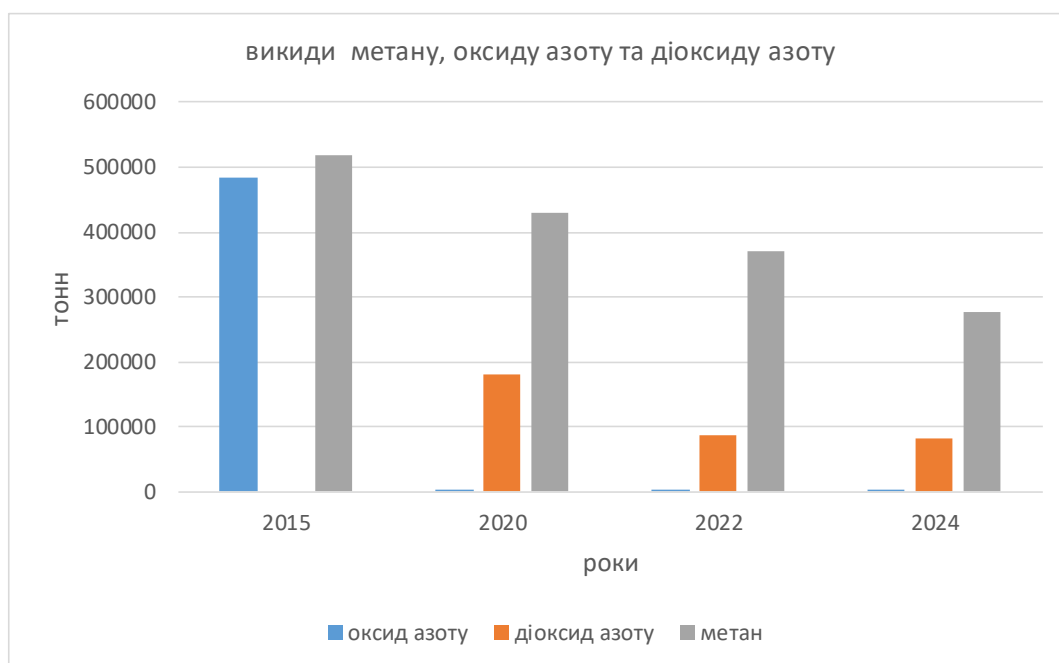


Рисунок 2. Викиди метану, оксиду азоту та діоксиду азоту в Україні від стаціонарних джерел

На рисунку 2 наведено динаміку викидів метану (CH_4), оксиду азоту (N_2O) та діоксиду азоту (NO_2) в Україні за 2015, 2020 та 2022–2024 роки.

У довоєнний період (2015–2020 рр.) спостерігається загальна тенденція до поступового скорочення викидів усіх досліджуваних газів. Це свідчить про певні позитивні зрушення у сфері екологічної політики, зменшення промислового навантаження та зміну структури економіки.

У період 2022–2024 рр. динаміка набуває більш нестабільного характеру. Викиди метану, який є другим за значенням парниковим газом після CO_2 , загалом знижуються, що пояснюється скороченням видобувної діяльності та зменшенням обсягів використання енергоносіїв. Викиди діоксиду азоту також демонструють тенденцію до зменшення, що пов'язано зі спадом промислової активності.

Разом з тим, викиди оксиду азоту характеризуються коливаннями, зокрема їх зростання у 2024 році може бути пов'язане з частковим відновленням окремих виробництв або специфікою технологічних процесів.

Загалом аналіз рисунка 2 підтверджує, що у довгостроковому періоді спостерігається зниження викидів, однак у воєнних умовах ці процеси є нестабільними та залежать передусім від економічної ситуації, а не від системної реалізації екологічної політики. Це підкреслює необхідність посилення заходів із забезпечення екологічної безпеки та контролю за викидами парникових газів.

Викиди вуглекислого газу від стаціонарних джерел в Україні за видами економічної діяльності наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Викиди вуглекислого газу від стаціонарних джерел в Україні за видами економічної діяльності¹⁰

Види економічної діяльності	2022 рік (тон)	2023 рік (тон)	2024 рік (тон)
1. Сільське, лісове та рибне господарство	1222493,117	1260911,540	1173885,731
2. Добувна промисловість і розроблення кар'єрів	1489041,971	1444258,041	1444660,070
3. Переробна промисловість	24355894,727	27814837,770	28964879,733

**РОЗДІЛ 1. ХІМІЧНА, РАДІАЦІЙНА ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА В УМОВАХ ВІЙНИ ТА
ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Продовження таблиці 1

Види економічної діяльності	2022 рік (тон)	2023 рік (тон)	2024 рік (тон)
4.Постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря	31129498,937	32807184,464	27443930,681
5.Водопостачання; каналізація; поводження з відходами	993623,580	1740576,132	135538,602
6.Будівництво	101185,529	99995,032	36596,695
7.Оптова та роздрібна торгівля; ремонт автотранспортних засобів і мотоциклів	713554,757	898549,340	49813,382
8.Транспорт, складське господарство, поштова та кур'єрська діяльність	1233987,228	905948,932	730428,865
9.Тимчасове розміщування й організація харчування	37694,058	27069,723	23034,946
10.Інформація та телекомунікації; фінансова та страхова діяльність; операції з нерухомим майном; діяльність у сфері адміністративного та допоміжного обслуговування	1687309,336	162588,049	1189796,120
11.Професійна, наукова та технічна діяльність; освіта	260346,390	289549,209	114473,399
12.Державне управління і оборона; обов'язкове соціальне страхування	76854,270	70867,591	66272,211
13.Охорона здоров'я та надання соціальної допомоги; мистецтво, спорт, розваги та відпочинок; надання інших видів послуг	91692,901	84681,590	79572,725
усього	63393176,8009999	67607017,413	61452883,16

Більш детальний аналіз викидів вуглекислого газу від стаціонарних джерел в Україні з початком військових дій дозволяє зробити наступні висновки:

1. Загальна динаміка викидів

Загальний обсяг викидів CO₂ в Україні:

2022 рік – 63,39 млн т;

2023 рік – 67,61 млн т;

2024 рік – 61,45 млн т.

У 2023 році спостерігається зростання викидів, а у 2024 – зниження. Це пояснюється:

у 2022 році – різким спадом виробництва через початок повномасштабної війни

у 2023 році – частковим відновленням економіки

у 2024 році - повторним спадом через руйнування енергетичної інфраструктури та економічною ситуацією

2. Найбільше викидів дають такі види діяльності:

1 місце: постачання електроенергії, газу, пари

2022: 31,1 млн т

2023: 32,8 млн т

2024: 27,4 млн т

2 місце: переробна промисловість

2022: 24,3 млн т

2023: 27,8 млн т

2024: 28,9 млн т

Ці дві галузі формують переважну частину всіх викидів (більше 80 %).

Основні причини: спалювання викопного палива (вугілля, газ), робота ТЕС і великих підприємств, енергоємність виробництва

3. Середні за рівнем викидів галузі:

1) добувна промисловість

2) транспорт і складське господарство

3) сільське господарство

Основні причини: скорочення логістики під час війни, зменшення видобутку, часткове зниження активності підприємств

4. Найменші обсяги викидів:

1) тимчасове розміщення і харчування;

2) будівництво;

3) державне управління.

Це пов'язано з низькою енергоємністю цих сфер.

Аналіз за роками в умовах війни показує:

2022 рік (початок війни): різке скорочення виробництва, зменшення викидів у транспорті, будівництві, часткове збереження енергетики.

2023 рік (адаптація): відновлення промисловості, зростання викидів у переробній промисловості та енергетиці, збільшення загального обсягу.

2024 рік (удари по енергетиці): зменшення викидів у сфері енергопостачання, подальше падіння у транспорті, торгівлі та будівництві, збереження або ріст у переробній промисловості.

6. Основні причини змін: військові дії, руйнування підприємств, скорочення виробництва, енергетична криза, обстріли ТЕС і підстанцій, нестабільна робота енергосистеми.

До економічних факторів можна віднести: падіння попиту, зменшення експорту, часткове відновлення економіки (2023), запуск підприємств, а також адаптація бізнесу.

На рисунку 3 представлена діаграма викидів вуглекислого газу в Європейському Союзі (27 країн з 2020 року)¹².

¹² URL:https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_ainah_r2/default/table?lang=en дата звернення: 5 травня 2026.

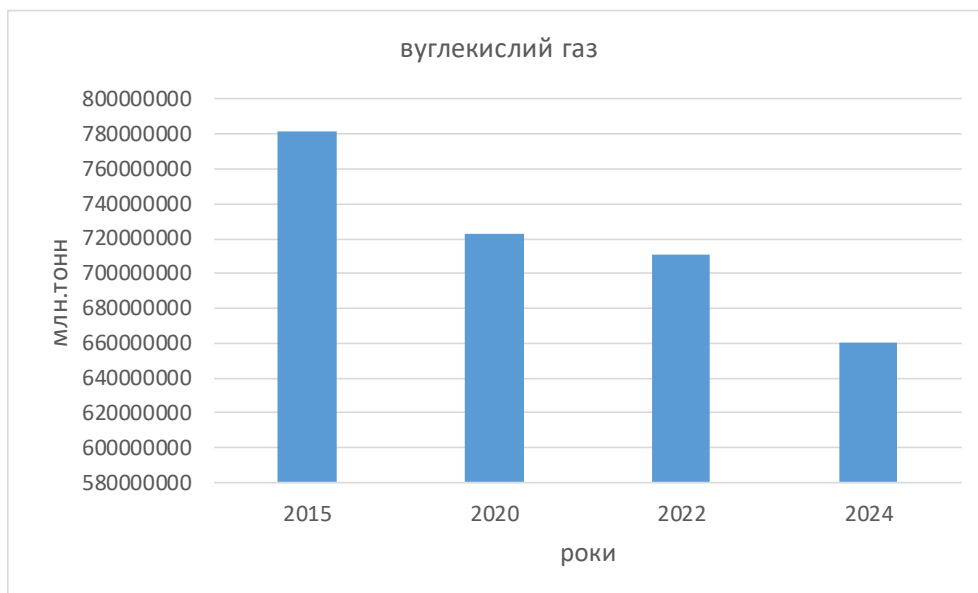


Рисунок 3. Викиди вуглекислого газу в Європейському Союзі

Аналіз рис.3 показує загальну тенденцію до зниження викидів CO₂ у країнах ЄС у 2015–2024 рр. До основних причин зниження викидів можна віднести перехід до відновлюваної енергетики, політику декарбонізації та підвищення енергоефективності.

На рисунку 4 представлена діаграма викидів метану та діоксиду азоту в Європейському Союзі (27 країн з 2020 року)¹¹.

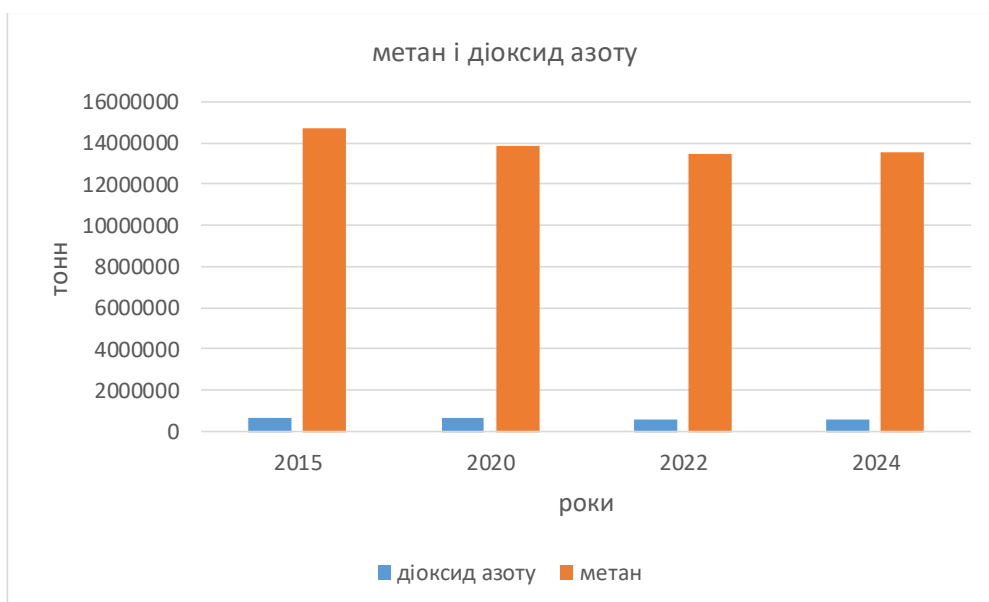


Рисунок 4. Викиди метану, діоксиду азоту в Європейському Союзі

Аналіз рис. 4 показує, що викиди діоксиду азоту стабільно зменшуються – це результат екологічної політики. Викиди метану знижуються повільніше, що пов'язано з сільським господарством та енергетикою.

На рисунку 5 представлена діаграма викидів вуглекислого газу в Європейському Союзі від виробництва, транспортування та зберігання¹¹.

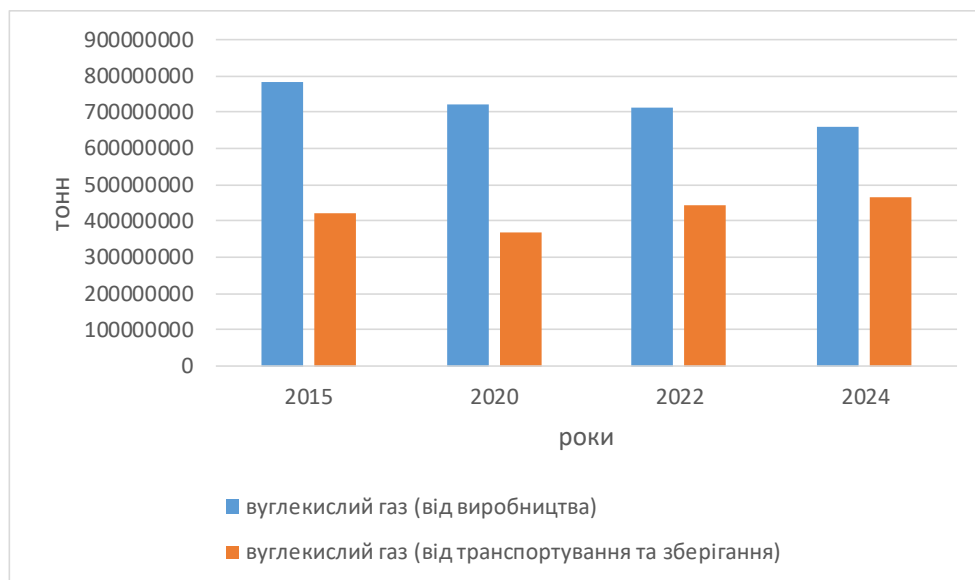


Рисунок 5. Викиди вуглекислого газу в Європейському Союзі від виробництва і від транспортування та зберігання

Аналіз рис. 5 показує, що викиди вуглекислого газу в Європейському Союзі від виробництва зменшуються, а викиди від транспортування зростають (особливо після 2020). Основні причини, які на це впливають: зростання логістики, збільшення мобільності населення, залежність транспорту від викопного палива. Це показує, що транспорт є слабким місцем екополітики ЄС.

На рисунку 6 представлена діаграма викидів метану та діоксиду азоту в Європейському союзі від виробництва, транспортування та зберігання¹¹.

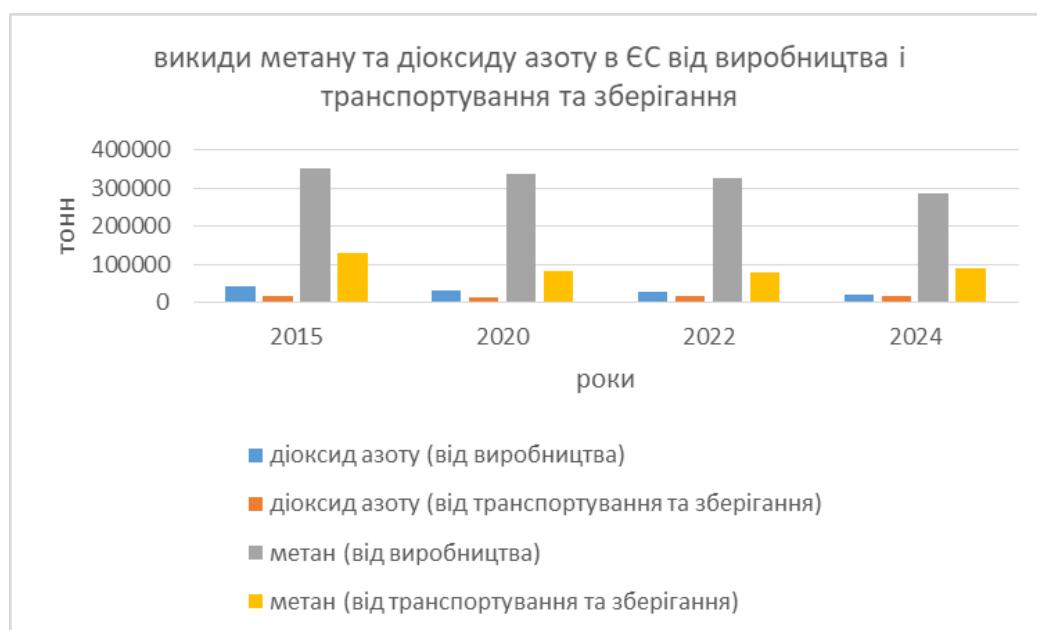


Рисунок 6. Викиди метану та діоксиду азоту в Європейському Союзі від виробництва і від транспортування та зберігання

Аналіз рис. 6 показує, що викиди від виробництва зменшуються, а викиди від транспорту нестабільні, особливо потрібно звернути увагу, що метан у транспорті навіть має тенденцію до зростання після 2020, а NO₂ частково зменшується, але повільно. Це свідчить про те, що транспортний сектор потребує додаткового регулювання.

Кумулятивне накопичення парникових газів у атмосфері формує довготривалий і практично незворотний вплив на кліматичну систему, виступаючи своєрідним глобальним «множником загроз» для екологічної безпеки. Такий ефект призводить до глибоких трансформацій як природних, так і соціально-економічних систем. Для довкілля це проявляється у деградації екосистем, втраті біорізноманіття та зникненні окремих видів, тоді як для суспільства – у значних економічних втратах, загрозах продовольчій безпеці та зростанні масштабів кліматичної міграції.

Парникові гази, зокрема вуглекислий газ, метан і закис азоту, характеризуються тривалим періодом перебування в атмосфері, що зумовлює їх накопичення протягом десятиліть і навіть століть. Унаслідок цього навіть повне скорочення викидів не призводить до миттєвої стабілізації клімату. Теплові процеси, пов'язані з нагріванням Світового океану та таненням льодовиків, мають інерційний характер і продовжуються протягом тривалого часу, формуючи відкладений ефект впливу на кліматичну систему.

Зростання середньої глобальної температури перевищує адаптаційні можливості багатьох біологічних видів, що призводить до руйнування природних екосистем і зниження їх стійкості. Накопичення надлишкової теплової енергії в атмосфері зумовлює збільшення частоти та інтенсивності екстремальних природних явищ, зокрема посух, повеней, лісових пожеж і ураганів. Додатковими наслідками є підвищення рівня Світового океану внаслідок теплового розширення води та танення льодовиків, що створює загрозу затоплення прибережних територій.

З позицій екологічної безпеки такі процеси мають комплексний характер і супроводжуються значними соціально-економічними ризиками. Часті природні катаклізми потребують значних фінансових ресурсів на відновлення інфраструктури, порушують логістичні зв'язки та негативно впливають на продуктивність праці. Зміна кліматичних умов, зокрема посухи та опустелювання, знижує врожайність сільськогосподарських культур, що веде до загострення продовольчої проблеми та зростання цін.

Крім того, дефіцит водних ресурсів, деградація земель і підвищення рівня моря спричиняють переміщення населення, що проявляється у внутрішній та міжнародній кліматичній міграції. Враховуючи відкладений характер впливу парникових газів, їх кумулятивний ефект становить значно більшу загрозу для екологічної безпеки, ніж короткострокові кліматичні аномалії.

У зв'язку з цим забезпечення екологічної безпеки потребує реалізації комплексних заходів, спрямованих як на адаптацію до змін клімату, так і на їх пом'якшення шляхом скорочення викидів парникових газів. Перехід до низьковуглецевої економіки та досягнення вуглецевої нейтральності є необхідною умовою стабільного розвитку та збереження сучасної цивілізації.

4. ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження, відповідно до поставленої мети, встановлено, що визначальний вплив на формування викидів CO₂ в Україні мають енергетичний сектор та переробна промисловість, які формують основну частку загального обсягу викидів парникових газів, тоді як сфера послуг і будівництво характеризуються мінімальним рівнем впливу.

Аналіз динаміки викидів CO₂ у 2022–2024 рр. дозволив виявити чітку залежність їх обсягів від стану економіки та функціонування енергетичної системи країни. Зокрема, у 2022 році зафіксовано різке зниження викидів унаслідок скорочення виробництва та порушення інфраструктури; у 2023

році – часткове відновлення економічної активності, що супроводжувалося зростанням викидів; у 2024 році – повторне їх зниження внаслідок руйнування енергетичної інфраструктури. Таким чином, підтверджено пряму залежність між рівнем економічної активності та обсягами викидів парникових газів.

Порівняльний аналіз із країнами Європейського Союзу показав, що для них характерною є стійка тенденція до скорочення викидів CO₂, що є результатом послідовної кліматичної політики та впровадження механізмів декарбонізації, тоді як в Україні динаміка викидів залишається нестабільною та значною мірою залежить від воєнних чинників.

Встановлено, що одним із найбільш проблемних секторів як в Україні, так і в країнах ЄС є транспорт, який залишається вагомим джерелом викидів парникових газів і потребує посиленої уваги в межах екологічної політики.

Отримані результати підтверджують, що забезпечення екологічної безпеки України в умовах кліматичних і воєнних викликів потребує реалізації комплексного підходу, який передбачає впровадження системи моніторингу, звітності та верифікації викидів, розвиток відновлюваної енергетики, зниження енергоємності виробництва та удосконалення державної кліматичної політики. Це створює підґрунтя для підвищення екологічної стійкості та досягнення цілей низьковуглецевого розвитку.

АНАЛІЗ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПИТНОЇ ВОДИ З КОЛОДЯЗІВ У СЕЛИЩАХ КОМАРІВКА ТА ПІДЛИМАН ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

ANALYSIS OF PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS OF DRINKING WATER FROM WELLS IN THE SETTLEMENTS OF KOMARIVKA AND PIDLYMAN, KHARKIV REGION

Хром'як Уляна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ulanajukovska@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4802-7555>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.07>

Анотація. Проведено порівняльний аналіз фізико-хімічних показників питної води з колодязів у селищах Комарівка та Підлиман Харківської області у вересні 2025 року. Досліджено, такі показники: загальна твердість, водневий показник, загальний солевміст, концентрація хлоридів, сульфатів, заліза, амонію, нітратів, нітритів, електропровідність. Встановлено перевищення норми за такими показниками: загальна твердість (18,72 ммоль/дм³ у с. Комарівка та 11,52 ммоль/дм³ у с. Підлимані), мінералізація (1670 мг/дм³/ppm та 1134 мг/дм³/ppm відповідно), електропровідність. У досліджених зразках не виявлено перевищень за вмістом нітратів, нітритів, амонію, сульфатів, хлоридів та заліза. Згідно з класифікацією ДСТУ 4808:2007, вода в с. Комарівка віднесена до четвертого класу якості води за такими показниками, як забарвленість, мінералізація, загальна твердість, вміст амонію, у с. Підлиман – такі показники, як запах і загальна твердість належать до четвертого класу якості води, а мінералізація, вміст амонію та водневий показник належать до третього та другого класу якості води. Результати дослідження вказують на обмежену придатність питної води до споживання місцевим населенням без попереднього оброблення та підтверджують необхідність впровадження заходів з очищення та постійного моніторингу якості води у прифронтових регіонах.

Ключові слова: питна вода, якість води, колодязь, фізико-хімічні показники, національні і європейські нормативи, воєнні дії.

Abstract. A comparative analysis of the physicochemical parameters of drinking water from wells in the settlements of Komarivka and Pidlyman, Kharkiv region, was conducted in September 2025. The following parameters were investigated: total hardness, pH, total dissolved solids, concentrations of chlorides, sulfates, iron, ammonium, nitrates, nitrites, and electrical conductivity.

Exceedances of the standard values were identified for the following indicators: total hardness (18.72 mmol/dm³ in Komarivka and 11.52 mmol/dm³ in Pidlyman), mineralization (1670 mg/dm³/ppm and 1134 mg/dm³/ppm, respectively), and electrical conductivity. No exceedances were detected for nitrates, nitrites, ammonium, sulfates, chlorides, or iron in the analyzed samples.

According to the classification of DSTU 4808:2007, the water in Komarivka is classified as Class IV (poor quality) based on indicators such as color, mineralization, total hardness, and ammonium content. In Pidlyman, indicators such as odor and total hardness fall into Class IV, while mineralization, ammonium content, and pH correspond to Classes III and II of water quality.

The results indicate limited suitability of the drinking water for consumption by the local population without prior treatment and confirm the need for implementing purification measures and continuous monitoring of water quality in frontline regions.

Keywords: drinking water, water quality, well, physico-chemical parameters, national and European standards, military actions.

1. ВСТУП

В умовах воєнного стану в Україні особливої актуальності набуває проблема забезпечення населення якісною питною водою. Масове руйнування інфраструктури, знищення водозаборів, забруднення джерел водопостачання внаслідок бойових дій, підриву об'єктів та застосування вибухонебезпечних речовин – спричинили появу нових ризиків для якості водних ресурсів, зокрема у сільській місцевості. Харківська область, яка частково знаходиться у зоні активних бойових дій, характеризується низьким рівнем централізованого водопостачання, а тому населення змушене використовувати воду з колодязів, які не проходять належного санітарного контролю. Це підвищує ризик хімічного та мікробіологічного забруднення питної води, що може призвести до загострення епідеміологічної ситуації. У зв'язку з цим, дослідження фізико-хімічних характеристик води з децентралізованих джерел у прифронтових населених пунктах є надзвичайно актуальним і має важливе значення для формування регіональної екологічної політики, охорони здоров'я та забезпечення водної безпеки населення.

Метою даного дослідження є дослідити фізико-хімічні показники якості питної води з колодязів у селищах Комарівка та Підлиман Харківської області та провести їх порівняльний аналіз відповідно до чинних національних і європейських нормативів.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПИТНОЇ ВОДИ

Якість питної води є одним із ключових факторів забезпечення екологічної безпеки та збереження здоров'я населення. У сучасних умовах зростаючого антропогенного навантаження та впливу воєнних дій на довкілля проблема забруднення водних ресурсів набуває особливої актуальності. Формування якісного складу води залежить від сукупності природних, техногенних і соціальних чинників, що потребує комплексного наукового підходу до її оцінки. Особливу увагу приділяють фізико-хімічним показникам води як основним критеріям її безпечності та придатності до споживання¹².

2.1. Проблеми якості питної води в Україні

Сучасні проблеми якості питної води у світі та в Україні є одними з найактуальніших викликів екологічної безпеки. Питна вода відіграє ключову роль у забезпеченні здоров'я населення та сталого розвитку суспільства. Водночас зростання антропогенного навантаження призводить до погіршення стану водних ресурсів. Основними джерелами забруднення є промислові скиди, сільськогосподарські стоки та побутові відходи. Значний вплив на якість води мають також процеси урбанізації та зміни клімату.

У глобальному масштабі проблема дефіциту якісної питної води набуває дедалі більшої гостроти. За оцінками міжнародних організацій, значна частина населення світу не має доступу до

¹ Центр громадського здоров'я України. Як забруднення води впливає на здоров'я людини [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ks.cdc.gov.ua/news/yak-zabrudnennya-vody-vplyvaye-na-zdorov-ya-lyudyny/> – Дата звернення: 21.04.2026.

² Державне агентство водних ресурсів України. Водна стратегія України до 2050 р. від 9 грудня 2022 р. 1134-р, Київ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.davr.gov.ua/news/uryad-shvaliv-vodnu-strategiyu-ukraini-do-2050-roku> – Дата звернення: 21.04.2026.

безпечної води. Особливо це стосується країн, що розвиваються, де системи водопостачання є недостатньо розвиненими. Забруднення води спричиняє поширення інфекційних та хронічних захворювань. Також, погіршення якості води негативно впливає на економічний розвиток регіонів.

В Україні проблема якості питної води має комплексний характер. Водні ресурси країни розподілені нерівномірно та значною мірою залежать від транскордонних надходжень. Значна частина водопровідних мереж перебуває у зношеному стані, що сприяє вторинному забрудненню води. Особливої уваги потребують децентралізовані джерела водопостачання, такі як криниці та свердловини. У цих джерелах часто фіксується перевищення гранично допустимих концентрацій хімічних речовин³.

Серед основних забруднювачів питної води в Україні виділяють нітрати, важкі метали та органічні сполуки. Надходження нітратів пов'язане переважно з використанням мінеральних добрив у сільському господарстві. Високий вміст важких металів може бути зумовлений промисловою діяльністю та зношеністю інфраструктури. Органічні забруднювачі потрапляють у воду разом із побутовими та промисловими скидами⁴.

Окремою проблемою є недостатній рівень очищення стічних вод. Багато очисних споруд працюють за застарілими технологіями та не забезпечують належного рівня очищення. Це призводить до потрапляння забруднювальних речовин у поверхневі та підземні води. У сільській місцевості ситуація ускладнюється відсутністю централізованих систем водовідведення⁵.

Важливим аспектом є також сезонна динаміка якості води. У періоди інтенсивних опадів зростає ризик змиву агрохімікатів у водні об'єкти. Це спричиняє тимчасове підвищення концентрацій забруднювачів. Водночас у літній період можливе зменшення рівня води та підвищення її мінералізації⁶⁷.

Відповідно до даних FAO⁸, сумарний обсяг відновлюваних водних ресурсів України становить 175,3 км³ на рік, з яких 170,3 км³ припадає на річковий стік, а 5,0 км³ – на підземні води. Внутрішні водні ресурси оцінюються у 55,1 км³ і включають місцевий річковий стік та підземні води. Загальний річковий стік формується за рахунок 50,1 км³ вод місцевого походження та 120,2 км³ транскордонного надходження, зокрема 36,1 км³ – з територій росії та білорусі, і 84,1 км³ – з Румунії.

У 2017 році забезпеченість населення України відновлюваними водними ресурсами становила 3964 м³ на одну особу, з яких 1246 м³ припадало на внутрішні ресурси. За цим показником держава займала середнє місце серед приблизно 50 країн Європи, що свідчить про помірний рівень водозабезпеченості.

Згідно з результатами дослідження⁹, у місті Львів якість води з природних джерел характеризується як незадовільна. У всіх відібраних пробах зафіксовано перевищення нормативних значень за вмістом кальцію, магнію, нітратів, нітритів, амонійного іону та сульфатів. Особливу небезпеку становить підвищена концентрація свинцю, яка в окремих джерелах перевищує гранично допустимі концентрації у 2-3 рази. Крім цього, показники загальної жорсткості води значно

³ Климчик О.М. Урбоекологія: навчально-методичний посібник. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. 208 с.

⁴ Бардов В. Г., Омельчук С. Т., Мережкіна Н. В. та ін. *Гігієна та екологія: підручник*. за заг. ред. В. Г. Бардова. Вінниця: Нова Книга, 2020. 472 с.

⁵ Лотоцька О. В., Кондратюк В. А., Кучер С. В. (2019). *Якість питної води як одна з детермінант громадського здоров'я в західному регіоні України. Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України*, 1(79), 12–18. DOI: 10.11603/1681-2786.2019.1.10278.

⁶ Боярин М. В., Нетребчук І. М. *Основи гідроекології: теорія і практика*. Луцьк: Вежа-Друк, 2016. 364 с.

⁷ Хільчевський В.К., Осадчий В.І., Курило С.М. *Основи гідрохімії*. К.: Ніка-Центр, 2012. 312 с.

⁸ Aquastat – FAO's. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en> – Дата звернення: 21.04.2026.

⁹ Степова К.В., Мусій К.В., Думас І.З. Оцінка якості води у природних джерелах м. Львова. *Вісник ЛДУБЖД*. № 20. 2019. с. 106-109.

перевищують встановлені нормативи, що обумовлює її непридатність для споживання без попереднього очищення.

У Львівській області, за результатами дослідження якості водопровідної води за період 2009-2015 років¹⁰, встановлено, що частка проб, які не відповідали нормативним вимогам, становила 3-6 % за хімічними показниками та 2,1-5,5 % – за мікробіологічними. Отримані дані свідчать про наявність системного забруднення навіть у централізованих системах водопостачання, що зумовлено, зокрема, зношеністю водопровідних мереж і недостатньою ефективністю очисних споруд. При цьому лише незначна частина населення застосовує додаткове очищення води у побутових умовах, переважно використовуючи індивідуальні фільтри, тоді як впровадження централізованих або громадських систем доочищення залишається обмеженим.

У населених пунктах Самбірської територіальної громади, відповідно до результатів дослідження Бриндзеї І.В.¹¹, концентрація амонію у воді варіювалася в межах 0,9-4,1 мг/дм³, причому в окремих пробах зафіксовано перевищення гранично допустимої концентрації (2,6 мг/дм³). Вміст фосфатів становив 0,035-0,073 мг/дм³, що не перевищує нормативних значень, однак вказує на надходження фосфорвмісних сполук, імовірно, внаслідок використання мийних засобів та аграрної діяльності. Концентрації нітритів коливалися в межах 0,0056-0,082 мг/дм³, тоді як вміст нітратів становив 11,3-18 мг/дм³, наближаючись до гранично допустимого рівня (50 мг/дм³). Показники мінералізації перебували в діапазоні 323-980 мг/дм³. Загальна твердість води в досліджуваних колодязях становила 5,9-8,2 ммоль/дм³, що в окремих випадках перевищувало нормативне значення (7 ммоль/дм³). Встановлено також сезонну динаміку показників: восени їх значення були вищими порівняно з весняним періодом, що може бути пов'язано з накопиченням забруднювальних речовин унаслідок атмосферних опадів та змиву агрохімікатів із сільськогосподарських угідь.

У селищі Брюховичі (Львівська область) протягом 12 років спостерігається негативна тенденція зміни якості води. Зокрема, рівень мінералізації зріс до значень, що наближаються до 1000 мг/дм³, унаслідок чого вода втратила ознаки прісної та перейшла до категорії слабкомінералізованої. Показники загальної твердості у двох свердловинах перевищили 9 ммоль/дм³, що виходить за межі допустимих норм. Також зафіксовано підвищення концентрацій натрію, кальцію, магнію, хлоридів і гідрокарбонатів, що свідчить про трансформацію гідрохімічного складу води та може бути зумовлено геологічними чинниками, зокрема близькістю до родовищ мінеральних вод¹²¹³¹⁴.

¹⁰ Крупка Н. О., Лотоцька-Дудик У. Б. Стан якості питної води Львівщини протягом 2009–2015 років. *Environment & Health*, 2016. №4, 23–29.

¹¹ Бриндзея І. В., Гойванович Н. К., Білокур Л. Р. Якість питної води населених пунктів Самбірської ТГ. *Acta Carpathica*, 2025. (2), 81–88. DOI: 10.32782/2450-8640.2024.2.9.

¹² Кальмук С., Сахнюк І., Кохан О., Занкович Г. Дослідження зміни якості питної води в південно-західній частині селища Брюховичі (Львівська область, Україна). *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2024. 1–2(193–194), 141–153. DOI: 10.15407/ggcm2024.193-194.141.

¹³ Кальмук, С. Д., Сахнюк, І. І., Мандзя, О. Б. Оцінка якості питної води у північно-західній частині Брюхович. У *Ресурси природних вод Карпатського регіону (Проблеми охорони та раціонального використання)*: збірн. наук. статей XII Міжн. наук.-практ. конф. 2013. Львів, 30–31 травня 2013 р. С. 122–124.

¹⁴ Кохан, О., Занкович, Г., Кальмук, С., Сахнюк, І., Герльовський, Ю. Моніторинг оцінки якості питної води у північно-західній частині смт Брюховичі (вул.Ожинова). У *Ресурси природних вод Карпатського регіону (Проблеми охорони та раціонального використання)*: збірн. наук. стат. XXI Міжнародної наук.-практ. конференції. Львів, 25–26 травня 2012 р. С. 31–33.

Слід відзначити, що також, проаналізовано якість питної води у лютому місяці 2025 року в м. Винники Львівської області водопровідної води по вул. Сухомлинського буд. 14 та із колодязя за адресою: вул. К. Гриневичевої буд. 17 (таблиця 2.1)^{15,16,17,18,19}.

Таблиця 2.1

Порівняльна характеристика фізико-хімічних показників якості питної води з колодязя та водопроводу (м. Винники, Львівська обл.)

Показник	Колодязь м. Винники Львівська обл.	Водопровідна вода м. Винники Львівська обл.	ДСанПіН 2.2.4-171-10	Директиви Ради 98/83/ЄС
Загальна твердість, ммоль/дм ³	16,2	6,12	7	1,5
Водневий показник (рН)	7,59	7,76	6,5-8,5	6,5-8,5
Загальний солевміст, мг/дм ³ /ppm	1043	461	1000	50-200
Концентрація заліза, мг/дм ³	0,1	0,0	0,2	0,1
Концентрація хлоридів, мг/дм ³	-	-	250	200
Концентрація сульфатів, мг/дм ³	-	-	250	150
Концентрація амонію, мг/дм ³	присутній	0,3	0,5	0,5
Концентрація нітратів, мг/дм ³	249,6	5,5	50	25
Концентрація нітритів, мг/дм ³	0,0	0,0	0,5	0,5
Електропровідність, мкСм/см	2086	922	-	-

Згідно з наведеними у таблиці 2.1 даними видно, що **загальна твердість води у колодязі становить 16,2 ммоль/дм³**, що значно перевищує допустиме значення (7 ммоль/дм³ за ДСанПіН та 1,5 ммоль/ дм³ за європейськими нормами). Це свідчить про надмірний вміст солей кальцію та магнію і потребу у пом'якшенні води перед споживанням. У водопровідній воді цей показник становить 6,12 ммоль/ дм³ і перебуває в межах українських нормативів.

Водневий показник (рН) у обох зразках (7,59 та 7,76) відповідає встановленим нормам (6,5-8,5), що свідчить про відсутність кислотно-лужного дисбалансу.

Загальний солевміст у воді з колодязя становить 1043 мг/ дм³, що перевищує норматив ДСанПіН (1000 мг/ дм³) та значно перевищує європейські рекомендації (50-200 мг/ дм³). У водопровідній воді цей показник (461 мг/ дм³) не перевищує українських норм, але також не відповідає більш жорстким європейським вимогам.

Концентрація заліза в обох зразках перебуває в межах допустимих значень (0,1 мг/ дм³ у колодязі та відсутня у водопровідній воді), що не створює ризиків для органолептичних властивостей та здоров'я.

¹⁵ Хром'як У.В., Воробець М.А. Вплив фізичних процесів на показники якості води з природних джерел м. Винники Львівської області. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2025. № 31. С. 16-21. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.31.2025.02>

¹⁶ Khromyak U., Bosak P., Telak O. Quality assessment of drinking water from different water supply sources in Vynnyky (Lviv region). *Environmental problems*. Vol. 10, № 3, 2025. pp. 252-258. <https://doi.org/10.23939/ep2025.03.252>

¹⁷ Хром'як У.В., Хром'як В.А. Екологічна якість природних вод з джерел м. Винники Львівської області. "V міжнародна науково – практична конференція «Екологічна безпека в умовах війни», 21 листопада 2024 р.: тези допов. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2024. С. 99-101.

¹⁸ Хром'як У.В., Воробець М.А. Дослідження якості питної води з різних джерел м. Винники Львівської області. *10-й Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»* 27-28 березня 2025 р.: тези допов. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2025. С. 81.

¹⁹ Хром'як У.В., Воробець М.А. Водневий показник (рН) води у м. Винники Львівської області. *XX Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності»*. 27-28 березня 2025 р.: тези допов. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2025. С. 638-641.

Найбільш критичним показником є **концентрація нітратів**: у воді з колодязя вона досягає 249,6 мг/ дм³, що у 5 разів перевищує допустимий рівень (50 мг/ дм³ за ДСанПіН та 25 мг/ дм³ за нормами ЄС). Це свідчить про значне антропогенне забруднення і робить воду непридатною для пиття. У водопровідній воді (5,5 мг/ дм³) перевищень не зафіксовано.

Нітрити в обох зразках відсутні, що є позитивним явищем.

Електропровідність води у колодязі (2086 мкСм/см) значно вища, ніж у водопровідній (922 мкСм/см), що вказує на підвищений вміст розчинених солей.

Вода з колодязя у м. Винники характеризується значними перевищеннями показників, що свідчить про її непридатність для питного використання без попереднього очищення. Водопровідна вода є значно кращою за якістю та в основному відповідає національним нормативам, хоча за окремими показниками не досягає стандартів ЄС.

У місті Вінниця результати досліджень якості води з артезіанських свердловин, колодязів і централізованої системи водопостачання свідчать, що лише вода з водопровідної мережі відповідає встановленим санітарним нормам. Водночас у джерелах децентралізованого водопостачання часто фіксується підвищений вміст нітратів, амонію та хлоридів. Вода з колодязів характеризується підвищеною жорсткістю та наявністю органічних забруднювачів, що обумовлює потенційну небезпеку для здоров'я населення, особливо для дітей і осіб із захворюваннями нирок²⁰.

У межах міста Харків, за результатами дослідження 2019 року²¹, встановлено, що у воді Холодногірського джерела показники загальної жорсткості перевищували нормативні значення у 5-6 разів, тоді як концентрації нітратів і нітритів перебували на гранично допустимому рівні. У Саржиному Яру зафіксовано зростання мінералізації у 3,4 рази порівняно з 2015 роком. Водночас вода з Жуковського джерела відповідала встановленим нормативам якості та була визначена як найбезпечніша для споживання. Виявлені регіональні відмінності підтверджують необхідність застосування диференційованого підходу до моніторингу та контролю якості водних ресурсів.

Відповідно до результатів дослідження 2022 року^{22,23} у місті Харкові, аналіз проб води з джерел Саржин Яр, Немишлянське та парку «Юність» показав, що показники загальної твердості знаходилися в межах 4,9-10,4 ммоль/дм³, причому у весняний період спостерігалися вищі значення. У воді Немишлянського джерела зафіксовано перевищення вмісту заліза, тоді як в інших досліджених джерелах цей показник відповідав гранично допустимим концентраціям. За інтегральним екологічним індексом більшість досліджених джерел віднесено до II класу якості (чиста вода), тоді як окремі проби відповідали I класу (дуже чиста вода). Водночас усі зразки відповідали нормативним вимогам за показниками рН, вмістом нітритів, нітратів, хлоридів, амонію, а також мікроелементів (кадмій, мідь, свинець, цинк, алюміній)²⁴.

2.2. Війна в Україні та її вплив на водні ресурси

²⁰ Петрук В. Г., Гайдей Ю. А., Вовк О. С. Аналіз стану якості питної води у колодязях м. Вінниці та Вінницької області. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2011. № 8 (48). С. 119-123.

²¹ Некос А.Н., Максимова А.М., Шевчик К.В. Екологічна якість природних вод з міських джерел м. Харкова. *Людина і довкілля. Питання неоекології*. 2019. № 31. с. 96-103.

²² Лісняк А.А., Кулик М.І. Оцінка якості питної води з природних джерел у межах міста Харкова. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2022. № 27. 20-31 с.

²³ Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Харківській області у 2022 р. Харків, 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kharkivoda.gov.ua/oblasna-derzhavna-administratsi>

²⁴ Екологічний атлас Харківської області – водні ресурси. 2016. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://only-maps.ru/sovremennye-karty/ekologichnij-atlas-xarkivsko%D1%97-oblasti-vodni-resursi.html> – Дата звернення: 21.04.2026.

Війна, що триває на території України з 2014 року й у лютому 2022 року переросла в повномасштабне вторгнення росії в Україну, стала не лише масштабною гуманітарною та геополітичною трагедією, а й завдала величезний негативний вплив на довкілля^{25,26}.

Серед найбільш вразливих природних компонентів, особливе місце посідають водні ресурси, які зазнають значного антропогенного та техногенного навантаження внаслідок воєнних дій, руйнування інфраструктури, хімічного забруднення та зміни стану водних ресурсів^{27,28}.

На території України розвинена система поверхневих і підземних вод, за рахунок якої забезпечується питне водопостачання населення, потреби сільського господарства, промисловості та енергетики. На даний час багато джерел зараз є або під контролем росії, або у зоні активних бойових дій, що не дозволяє їхнє безпечне використання. Знищення очисних споруд, насосних станцій, водогонів, а також гідротехнічних об'єктів, а саме Каховської ГЕС, створило велику кількість екологічних ризиків як для внутрішніх водних систем, так і для Чорного та Азовського морів.

На даний час, під час війни в Україні якість питної води стала критичною складовою національної безпеки. Збройний конфлікт призвів до масового руйнування об'єктів інфраструктури, знищення очисних споруд, пошкодження трубопроводів, затоплення шахт, порушення санітарних зон, що створило багаторівневі загрози для водних ресурсів, зокрема джерел питного водопостачання.

Значну небезпеку становить знищення об'єктів централізованого водозабезпечення та водовідведення. В умовах бойових дій припиняється робота насосних станцій, систем фільтрації та хлорування води. Це призводить до того, що населення змушене використовувати джерела води без належної обробки: з колодязів, відкритих водойм, свердловин, багато з яких можуть бути мікробіологічно забруднені. В умовах війни це створює високі ризики поширення інфекцій: дизентерії, холери, гепатиту А, сальмонельозу.

Крім мікробіологічного забруднення, надзвичайної актуальності набуває хімічне навантаження на водні об'єкти. Пошкодження або підлив складів із паливом, хімічними речовинами, зброєю, промислових підприємств призводить до потрапляння у воду нафтопродуктів, важких металів (свинець, ртуть, мідь, кадмій), фенолів, нітратів, сульфатів, хлоридів. Особливо небезпечним є потрапляння вибухових речовин і компонентів ракетного палива, зокрема гідразину (надзвичайно токсичної та канцерогенної сполуки).

Підлив Каховської ГЕС у червні 2023 року спричинив одну з найбільших екологічних катастроф за останні десятиліття. Знищення водосховища не лише позбавило питної води великі міста півдня України, а й спричинило масштабне забруднення річки Дніпро через вимивання мулу з дна, загибель риби та тварин, руйнування каналізаційних систем у затоплених містах. Крім цього, в осушених ділянках сформувались нові осередки бактеріального та хімічного забруднення, які можуть мігрувати в ґрунтові води.

²⁵ Окупанти зруйнували каналізаційні очисні споруди у Запорізькій області. Стічні води течуть у Дніпро. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zn.ua/ ukr/UKRAINE/okupanti-zrujnuvali-kanalizatsijni-ochisni-sporudi-u-zaporizkij-oblasti-stichni-vodi-techut-u-dnipro.html>

²⁶ Строкаль, В.П., Ковпак, А.В. (2022). Воєнні конфлікти та вода: наслідки й ризики. *Науково-практичний журнал. Екологічні науки*. 5(44). 94-102. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14>

²⁷ Якими є наслідки російського теракту на каховській ГЕС для дикої природи? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uncg.org.ua/iakymy-ie-naslidyk-rosijskoho-teraktu-na-kakhovskij-hes-dlia-dykoj-pryrody/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwsPCyBhD4ARIsAPaaRf2aF4ipRaY731PM4b3p-6jvt_OmluASkuz_EowO81VN9y3NTjrnwbEaAtKZEALw_wcB

²⁸ Сплідитель, А., Голубцов, О., Чумаченко, С., Сорокіна Л. (2023). Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу. Київ. ГО "Центр екологічних ініціатив «Екодія». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii-summary.pdf>

Окрему загрозу становлять шахтні води на Донбасі. Внаслідок руйнування електропостачання й зупинки насосів відбувається затоплення шахт. Це призводить до виділення високомінералізованих вод із великим вмістом солей, заліза, сульфатів, селену, що надходять у річкові системи, а саме в Сіверський Донець, який забезпечував водопостачання великих міст. У зоні ризику опинилися навіть ті свердловини, які вважалися стратегічними резервами питної води.

Ситуація ускладнюється відсутністю належного моніторингу води. Бойові дії унеможливають проведення відбору проб, аналізів, лабораторного контролю. Через постійні обстріли фахівці водоканалів та санітарно-епідеміологічних служб не можуть забезпечити системну роботу. Брак реагентів, пального, обладнання та лабораторних умов призводить до фактичного неконтрольованого споживання води з невідомими складниками.

У селах і прифронтових населених пунктах люди змушені пити воду з криниць або джерел, які можуть бути забруднені через руйнування складів, кладовищ, місць загибелі тварин або бойових дій. Є випадки, коли в колодязях фіксувалися залишки пально-мастильних матеріалів, шкідливі розчинники, зокрема в місцях розташування техніки або складів боєприпасів.

Особливу тривогу викликає небезпека потрапляння у водоносні горизонти залишків зброї, у тому числі заборонених боєприпасів, а саме касетних, фосфорних. Їх елементи здатні довго зберігати токсичність у ґрунті й проникати у воду в процесі вилугування. Це створює загрозу для всього регіону на десятиліття.

За даними українських екологічних організацій, на території України вже забруднено близько 200 тис. км² території, з якої значна частина є джерелами або водозабірними зонами. Забруднення цих територій перешкоджає безпечному водопостачанню. Очищення таких територій потребує роки й мільярдні інвестиції.

Додатковою проблемою є хімічне забруднення через горіння складів, нафтобаз, сміттєзвалищ, які часто стають мішенями ракетних ударів. Дим і продукти горіння, що осідають на поверхні водойм або проникають у ґрунт, у подальшому надходять у водоносні горизонти. Частина речовин утворює стійкі органічні забруднювачі, які неможливо видалити звичайними методами очищення.

Таким чином, війна спричинила катастрофу системи безпеки питного водопостачання на значній частині території України. Це вимагає термінових рішень на державному та міжнародному рівнях. До яких можна віднести: створення мобільних систем очистки, розгортання пересувних лабораторій, залучення міжнародної допомоги для проведення гідрогеологічної експертизи, екстрене буріння свердловин у безпечних зонах.

2.3. Аналіз якості питної води у Харківській області (на прикладі с. Комарівка)

Харківська область розташована на межі двох водозбірних басейнів Дону (через Сіверський Донець) та Дніпра. Регіон характеризується вкрай низьким рівнем забезпечення водними ресурсами (1,8 % від загального обсягу водних ресурсів України). Основними джерелами водопостачання є підземні води та поверхневі води з басейнів річок Сіверського Донця та Дніпра. Зокрема, Печенізьке та Краснопавлівське водосховища забезпечують водою посушливі райони, такі як Лозівський, Харківський, а також місто Харків²⁹.

На території області протікає 867 річок загальною довжиною 6 405 км, з яких 172 річки мають протяжність близько 10 км (разом 4700 км). Відповідно до класифікації річок України, до великих річок

²⁹ Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Харківській області у 2022 р. Харків, 2023. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kharkivoda.gov.ua/oblasna-derzhavna-administratsiya/struktura-administratsiyi/struktur-ni-pidrozdili/486/2736/123378>

належить лише Сіверський Донець (загальна довжина 1053 км, у межах області 375 км). До середніх річок віднесено Оскіл, Уди, Лопань, Мерлу, Оріль та Самару. Решта річок класифікуються як малі.

Водні об'єкти займають площу 91,3 тис. га, що становить 2,9 % території області, з яких 46,3 тис. га припадає на водосховища та ставки.

Водні ресурси Харківської області включають поверхневі та підземні води, що розташовані на території регіону та використовуються для побутових і господарських потреб. Ці ресурси є ключовим елементом для забезпечення життєдіяльності населення, підтримки флори та фауни. Водночас вони мають обмежений характер і є вразливими природними компонентами ³⁰.

Поверхневі води значно швидше реагують на зміни кліматичних умов, скиди стічних вод, сільськогосподарські витoki. Наприклад, у роки з посушливим літом (2020, 2022), концентрація біогенних елементів у ставках та малих річках зростала в 2-3 рази, що зумовлювало «цвітіння» води, зниження прозорості й появу патогенних мікроорганізмів. Підземні ж води, попри кращу якість у вихідному стані, в умовах втрати гідрогеологічного захисту (через будівництво, зсуви ґрунтів, обстріли) стають джерелом епідеміологічного ризику, оскільки забруднення складно виявити без лабораторного аналізу, а наслідки виявляються лише після спалахів хвороб.

Особливу загрозу для водної безпеки в сільських районах Харківської області становить залежність від колодязів як єдиного джерела питної води. Згідно з моніторинговими звітами «Екодії» та «ViktorLab» (2023), понад 70 % сільського населення Ізюмського району використовують воду з шахтних колодязів без жодного очищення чи обстеження. У с. Комарівка, що розташоване у південній частині області, централізоване водопостачання відсутнє. Мешканці користуються здебільшого неглибокими (5-10 м) колодязями, розташованими поблизу господарських споруд, у тому числі гноєсховищ, вигрібних ям та туалетів. Відсутність санітарної охоронної зони, бетонної відмостки та дренажу сприяє прямому потраплянню у воду органічних речовин, бактерій та хімікатів.

У 2025 році Ізюмським відокремленим структурним підрозділом Державної установи «Харківський обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України» проведено лабораторне дослідження питної води із шахтних колодязів за адресою: вул. Миру, 17, та вул. Миру, 55 у с. Комарівка Оскільська територіальна громада Ізюмський район Харківська область. Метою дослідження було встановлення відповідності фізико-хімічних та мікробіологічних показників діючим нормативам – ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною», а також виявлення потенційних ризиків для здоров'я населення.

Відбір проби води здійснено у травні 2025 року спеціалістами лабораторії Ізюмським відокремленим структурним підрозділом Державної установи «Харківський обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України». Досліджувалися наступні показники: водневий показник рН, загальна жорсткість, сухий залишок, вміст аміаку, нітритів, нітратів, хлоридів, сульфатів, фтору (таблиця 2.2)³¹.

³⁰ Некос, А.Н., Максимова, А.М., Шевчик, К.В. (2019). Екологічна якість природних вод з міських джерел м. Харкова. *Людина і довкілля. Питання неоекології*. (31). 96-103.

³¹ Увага! Вода з колодязів у с. Комарівка - непридатна для пиття! [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://oskilkasirada.gov.ua/news/1751963803/>

Таблиця 2.2

Показники якості питної води з громадських шахтних колодязів в с. Комарівка

Показники	с. Комарівка, вул. Миру, 17	с. Комарівка, вул. Миру, 55
Водневий показник (pH)	7,12	7,48
Аміак, мг/дм ³	0,24	0,79
Нітрити, мг/дм ³	< 0,002	0,03
Нітрати, мг/дм ³	70,6	207,9
Загальна жорсткість, ммоль/дм ³	24,8	20,4
Сухий залишок, мг/дм ³	2352,0	1660,0
Хлориди, мг/дм ³	143,1	78,4
Сульфати, мг/дм ³	1204,5	490,9
Фтор, мг/дм ³	0,21	0,67

За результатами аналізу питної води з громадського шахтного колодязя в с. Комарівка вул. Миру, 17 загальна жорсткість води становила 24,8 ммоль/дм³, що у 3,5 раза перевищує допустимий рівень згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10. Такий рівень жорсткості свідчить про надмірну концентрацію іонів кальцію та магнію, що негативно впливає на смакові властивості води, викликає осад у побутових приладах та сприяє утворенню каменів у нирках за тривалого вживання.

Концентрація нітратів становила 143,1 мг/дм³, що у 2,9 раза перевищує допустимий рівень згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10. Нітрати є поширеним забруднювачем ґрунтових вод, особливо в регіонах з активним сільським господарством. Їх надмірна кількість у воді вказує на потрапляння агрохімікатів з сільськогосподарських полів або на неефективну систему каналізації. Найбільш вразливою до нітратного отруєння групою є діти до трьох років, у яких може розвинути метгемоглобінемія, яка блокує транспорт кисню гемоглобіном.

Сухий залишок 2352 мг/дм³, що є перевищенням у 2,3 раза нормативу. Цей показник свідчить про загальну мінералізацію води, тобто наявність у ній великої кількості розчинених солей. Високий рівень сухого залишку погіршує смак води та свідчить про потребу в очищенні.

Сульфати були виявлені в кількості 1204,5 мг/дм³ при нормативі <500 мг/дм³, тобто перевищення становить у 2,4 раза. Надмірна кількість сульфатів може викликати послаблювальну дію (особливо у дітей), спричинити розлади шлунково-кишкового тракту та підвищити загальну осмотичність води.

У пробі води було виявлено 21 одиницю коліформ на 100 см³, що категорично не допускається в питній воді згідно з вимогами ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Наявність коліформ свідчить про мікробіологічне забруднення фекального походження, що, ймовірно, пов'язано з недостатнім санітарним захистом колодязя або його розташуванням поблизу джерел забруднення (вигрібні ями). Це створює високий ризик поширення гострих кишкових інфекцій, включно з дизентерією, сальмонельозом та іншими.

Слід відзначити, що вода із громадського шахтного колодязя на вул. Миру, 55 с. Комарівка також не відповідає критеріям безпечності та якості. Результати аналізу якості питної води з громадського шахтного колодязя, розташованого в с. Комарівка (вул. Миру, 55), свідчать про суттєві відхилення деяких показників від нормативних значень. Водневий показник (pH = 7,48) перебуває в межах допустимих значень, що вказує на нейтральну реакцію середовища. Концентрації аміаку (0,79 мг/дм³) та нітритів (0,03 мг/дм³) не перевищують гранично допустимих рівнів.

Водночас вміст нітратів є критично високим і становить $207,9 \text{ мг/дм}^3$, що значно перевищує нормативні значення та може становити серйозну загрозу для здоров'я населення. Показник загальної жорсткості ($20,4 \text{ ммоль/дм}^3$) також суттєво перевищує допустимі межі, що свідчить про високий вміст солей кальцію та магнію у воді. Значення сухого залишку ($1660,0 \text{ мг/дм}^3$) вказує на підвищену мінералізацію води.

Концентрації хлоридів ($78,4 \text{ мг/дм}^3$) перебувають в межах нормативних значень, тоді як вміст сульфатів ($490,9 \text{ мг/дм}^3$) наближається до гранично допустимого рівня. Вміст фтору ($0,67 \text{ мг/дм}^3$) відповідає оптимальним значенням для питної води.

У зв'язку з проведеними у травні 2025 року дослідженнями якості питної води з колодязя у селі Комарівка, виконаних Ізюмським відокремленим структурним підрозділом Державної установи «Харківський обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України» з'явилася необхідність повторного аналізу проб води у вересні 2025 року в колодязях населених пунктів Комарівка та для порівняння також із с. Підлиман Харківської області. Метою дослідження стало виявлення змін у якості питної води та оцінка впливу сезонного чинника на її показники.

Слід відзначити, що селища Комарівка та Підлиман Харківської області були під окупацією росії близько шести місяців у 2022 році і на даний час знаходяться на невеликій відстані від активних бойових дій (рис. 1, 2), тому актуально дослідити якість питної води у колодязях селища Комарівка та Підлиман.

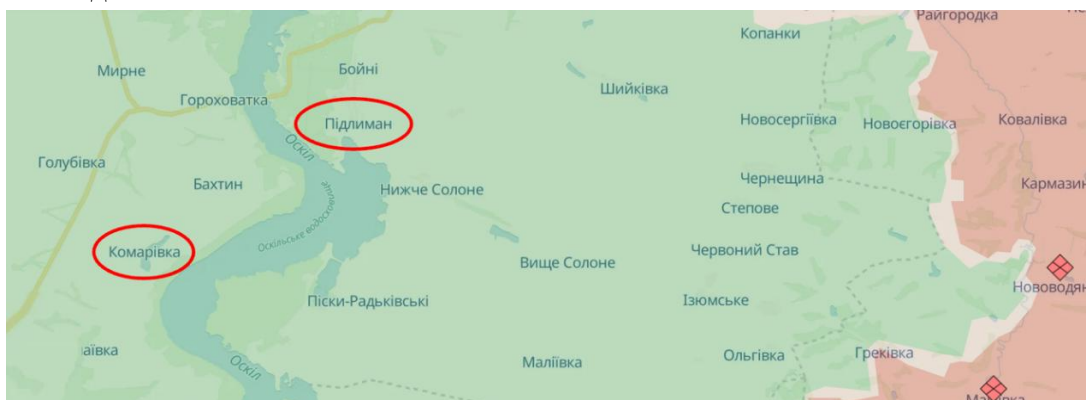


Рисунок 1. Географічне розташування селища Комарівка та Підлиман Харківської області

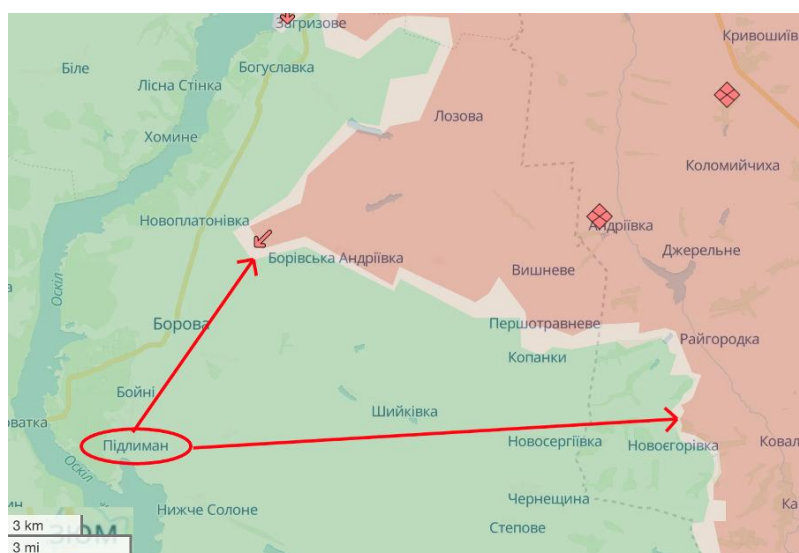


Рисунок 2. Географічне розташування с. Підлиман Харківської області та відстань до лінії фронту (осінь, 2025 року)

На рис. 1 і 2 наведено географічне розташування сіл Комарівка та Підлиман Харківської області в межах басейну річки Сіверський Донець, а також їх просторове положення відносно лінії фронту станом на осінь 2025 року. Показано близькість населених пунктів до водних об'єктів і зон ведення бойових дій. Це підкреслює поєднання природно-географічних та антропогенних чинників, що впливають на стан водних ресурсів.

2.4. Медико-біологічні наслідки впливу забрудненої води на організм людини

Вода є невід'ємною складовою існування біологічних систем і відіграє ключову роль у підтриманні гомеостазу організму людини. Якість питної води безпосередньо впливає на стан здоров'я людей, тривалість життя та рівень захворюваності населення. В умовах зростаючого антропогенного навантаження, зумовленого промисловими викидами, інтенсифікацією сільського господарства, урбанізацією та нераціональним управлінням відходами, відбувається прогресуюче забруднення водних ресурсів. Це призводить до накопичення у воді біологічних, хімічних і фізичних контамінантів, що становлять серйозну загрозу для здоров'я людини.

Слід відзначити, що забруднення води поділяється на кілька основних типів. Біологічне забруднення пов'язане з наявністю патогенних мікроорганізмів (бактерій, вірусів, паразитів), які є збудниками інфекційних і паразитарних захворювань. Хімічне забруднення включає широкий спектр токсичних речовин, зокрема важкі метали (свинець, ртуть, кадмій), пестициди, нітрати, нітрити, фармацевтичні залишки, феноли та поверхнево-активні речовини. Фізичне забруднення представлено механічними домішками, мікропластиком, радіонуклідами та тепловим впливом. Органічне забруднення зумовлене надходженням у водні об'єкти стічних вод і продуктів розкладання органічних речовин, що призводить до зниження вмісту розчиненого кисню та розвитку процесів евтрофікації.

Медико-біологічні наслідки споживання забрудненої води мають комплексний характер і реалізуються через інфекційні, токсикологічні, імунологічні та генетичні механізми впливу. Однією з найпоширеніших груп наслідків є інфекційні та паразитарні захворювання, що передаються водним шляхом. Патогенні мікроорганізми потрапляють в організм через шлунково-кишковий тракт, викликаючи такі хвороби, як холера, дизентерія, черевний тиф, вірусний гепатит А, а також паразитарні інвазії (лямбліоз, криптоспоридіоз). Ці захворювання можуть супроводжуватися тяжкими порушеннями водно-електролітного балансу, інтоксикацією та, у разі відсутності своєчасного лікування, призводити до летальних наслідків³².

Не менш важливим є токсичний вплив, зумовлений хімічним забрудненням води. Важкі метали та інші токсиканти здатні до біоаккумуляції в організмі, що спричиняє хронічну інтоксикацію. Нейротоксична дія проявляється у вигляді порушень когнітивних функцій, зниження пам'яті та концентрації уваги, особливо у дітей. Ураження печінки та нирок пов'язане з накопиченням токсичних речовин у цих органах, що може призводити до розвитку хронічних захворювань, включаючи цироз і ниркову недостатність. Крім того, тривалий вплив канцерогенних сполук підвищує ризик розвитку онкологічних захворювань, зокрема раку шлунка, печінки, нирок і сечового міхура.

Шлунково-кишковий тракт є первинною мішенню дії забрудненої води. Споживання води, що містить патогенні мікроорганізми або хімічні домішки, може викликати гострі гастроентерити, що проявляються діареєю, блюванням і болем у животі. У разі тривалого впливу можливий розвиток

³² Медико-біологічні та соціальні проблеми здоров'я [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/pre-view/5394675/page:4/> – Дата звернення: 21.04.2026.

хронічних ентеропатій, порушення процесів травлення та всмоктування поживних речовин, а також дисбіотичні зміни кишкової мікрофлори. Особливу небезпеку становить метгемоглобінемія, яка виникає при високому вмісті нітратів у воді та призводить до порушення транспорту кисню кров'ю, особливо у немовлят.

Хронічне надходження забруднювачів також негативно впливає на імунну систему. Відбувається зниження загальної резистентності організму, пригнічення клітинного та гуморального імунітету, що підвищує схильність до інфекційних та аутоімунних захворювань. Постійна дія токсинів може підтримувати стан хронічного запалення, який є фактором ризику розвитку багатьох неінфекційних патологій.

Окрему групу становлять ендокринні та метаболічні порушення. Деякі хімічні речовини, присутні у воді, належать до так званих ендокринних дизрапторів, які здатні порушувати гормональний баланс організму. Це може призводити до дисфункції щитоподібної залози, порушення обміну речовин, розвитку ожиріння, метаболічного синдрому та цукрового діабету.

Забруднена вода також негативно впливає на репродуктивну систему людини. Токсичні речовини можуть знижувати фертильність, порушувати процеси сперматогенезу та овогенезу, а також чинити тератогенний вплив на плід. Внаслідок цього підвищується ризик вроджених аномалій, затримки внутрішньоутробного розвитку, викиднів і передчасних пологів.

Деякі забруднювачі води мають генотоксичні властивості, тобто здатні пошкоджувати ДНК і викликати мутації. Це може призводити до розвитку спадкових патологій, а також сприяти канцерогенезу. Епігенетичні зміни, викликані впливом токсинів, можуть передаватися наступним поколінням, що підсилює довгострокові наслідки забруднення води.

З метою зменшення негативного впливу забрудненої води на здоров'я людини необхідно застосовувати комплекс профілактичних заходів. До них належать використання сучасних технологій очищення води (фільтрація, адсорбція, мембранні методи, зворотний осмос), кип'ятіння води для знищення патогенних мікроорганізмів, регулярний моніторинг якості води та контроль джерел водопостачання. Важливим є також дотримання екологічних норм, зменшення використання пластику та токсичних хімічних речовин, а також підвищення екологічної свідомості населення.

Таким чином, забруднення води є важливою глобальною проблемою, що має багатогранний вплив на здоров'я людини. Його наслідки охоплюють усі системи організму та можуть проявлятися як у вигляді гострих інфекційних захворювань, так і у формі хронічних патологій, включаючи онкологічні, ендокринні та генетичні порушення. Забезпечення доступу до безпечної питної води є одним із пріоритетних завдань сучасного суспільства та важливою умовою збереження здоров'я населення.

3. МЕТОДОЛОГІЯ

Для оцінки якості питної води було проведено серію відбору проб з двох колодязів, розташованих у селищах Комарівка та Підлиман Харківської області кадровим військовим Збройних Сил України з дотриманням всіх вимог по відбиранню проб води.

Ці селища розташовані неподалік одне від одного у південно-східній частині Харківської області, поблизу межі з Донецькою областю. Обидва населені пункти знаходяться в зоні лісостепу, їх розділяє річка Оскіл і входять до одного адміністративного району (Ізюмський район). Відстань між цими селищами становить 9,4 км (рис. 3.).



Рисунок 3. Географічне розташування селищ Комарівка та Підлиман Ізюмського району Харківської області та відстань між точками відбору проб

Відбір проб проводився у вересні 2025 року. Аналізи проводилися у Науково-дослідній лабораторії екологічної безпеки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, яка має необхідний набір приладів, обладнання та реактивів для виконання хімічних аналізів проб атмосфери, води та ґрунтів, і атестована у системі державного метрологічного нагляду (свідоцтво про атестацію «ПЛ 091/21 від 30.11.2021 р.).

Під час відбору проб на місцях було проведено аналіз органолептичних властивостей води, зокрема запаху, зовнішнього вигляду (характерний колір, каламутність, осад). Додатково визначено такі показники: загальну твердість, водневий показник, загальний солевміст, концентрація хлоридів, сульфатів, заліза, амонію, нітратів, нітритів, електропровідність.

Визначення вищевказаних показників проводилося за стандартними методиками, які відповідають чинним національним нормативам у галузі контролю якості питної води, а саме: ДСТУ EN 1420-1:2004, ДСТУ ISO 7887:2003, ДСТУ 4077-2001, ДСТУ ISO 15923-1:2018 та ДСТУ ISO 6059:2003^{33,34,35,36,37}.

Система забезпечення якості водних ресурсів в Україні ґрунтується на сукупності законодавчих актів та нормативно-технічних документів, що визначають правові, санітарно-

³³ ДСТУ EN 1420-1:2004 Якість води. Визначення впливу органічних речовин на якість води, призначеної для споживання людиною. Проведення оцінювання води в трубопровідних системах на запах і присмак. Частина 1. Метод випробовування (EN 1420-1:1999, IDT). Київ, (2004). https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=73065&minregion=852

³⁴ ДСТУ ISO 7887:2003 Якість води. Визначення і досліджування забарвленості (ISO 7887:1994, IDT). Київ, (2003). http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=72427

³⁵ ДСТУ 4077-2001 Якість води. Визначення pH (ISO 10523:1994, MOD). Київ, (2001). http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=52791

³⁶ ДСТУ ISO 15923-1:2018 Якість води. Визначення окремих параметрів з використанням систем дискретного аналізу. Частина 1. Вміст амонію, нітрату, нітриту, хлориду, ортофосфату, сульфату та силікату з фотометричним детектуванням (ISO 15923-1:2013, IDT). Київ, (2018). http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=79777

³⁷ ДСТУ ISO 6059:2003 Якість води. Визначення сумарного вмісту кальцію та магнію. Титриметричний метод із застосуванням етилендіамінтетраоцтової кислоти (ISO 6059:1984, IDT). Київ, (2003). http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=52715

гігієнічні та технічні вимоги до стану води, а також встановлюють механізми державного контролю і відповідальності за їх недотримання.

Базовим нормативно-правовим актом у сфері регулювання водних відносин є Водний кодекс України (1995 р.), який окреслює принципи раціонального використання, охорони та відтворення водних ресурсів. Документ визначає правовий статус водокористувачів, регламентує порядок надання дозволів на водокористування та встановлює засади контролю за станом водних об'єктів³⁸.

Вагоме значення має Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», що формує загальні принципи екологічної політики держави та передбачає заходи із запобігання забрудненню водних ресурсів і забезпечення екологічної безпеки³⁹.

Слід звернути увагу на Закон України «Про питну воду, питне водопостачання та водовідведення» (№ 2918-III), що виконує базову системоутворюючу функцію, оскільки визначає інституційні, економічні та організаційні засади функціонування галузі. Його значення полягає у встановленні правових рамок взаємодії між суб'єктами водопостачання, а також у закріпленні гарантій доступу населення до безпечної питної води. Водночас закон має загальний характер і потребує деталізації через підзаконні нормативні акти⁴⁰.

Ключову роль у забезпеченні санітарно-епідеміологічної безпеки відіграють Державні санітарні норми та правила (ДСанПіН 2.2.4-171-10), які конкретизують критерії якості води шляхом встановлення гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин. Їх наукова цінність полягає у впровадженні комплексного підходу до оцінки безпечності води, що включає епідеміологічні, хімічні та радіаційні показники. Таким чином, ДСанПіН виступає інструментом практичної реалізації державної політики у сфері охорони здоров'я⁴¹.

Важливим також є ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги до якості та методи визначення», який забезпечує стандартизацію процедур контролю якості води. Він регламентує методологічні підходи до відбору проб, проведення лабораторних досліджень і оцінювання результатів. Важливою характеристикою стандарту є його гармонізація з міжнародними вимогами, що сприяє підвищенню достовірності та порівнянності результатів моніторингу.

4. РЕЗУЛЬТАТИ

Забезпечення населення якісною питною водою є однією з найактуальніших завдань сьогодення, особливо в умовах воєнного часу, коли інфраструктура є частково зруйнована. У зв'язку з цим виникає необхідність у проведенні постійного моніторингу якості води з децентралізованих джерел, а саме колодязів, які є основним джерелом водопостачання для значної частини сільського населення України.

На даний час є важливо дослідити якість питної води з колодязів селищ Комарівка та Підлиман Харківської області. Особливу увагу приділено порівнянню одержаних результатів із вимогами національних (ДСанПіН 2.2.4-171-10) та європейських (Директива 98/83/ЄС) стандартів⁴².

³⁸ Водний кодекс України від 6 червня 1995 р. № 213/95-ВР. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80/page> – Дата звернення: 21.04.2026.

³⁹ Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України № 1268-XII від 26.06.1996. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> – Дата звернення: 21.04.2026.

⁴⁰ Про питну воду та питне водопостачання : Закон України № 2887-IX від 12.01.2023 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2918-14> – Дата звернення: 21.04.2026.

⁴¹ Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» від 12.05.2010 № 400. (ДСанПіН 2.2.4-171-10). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10> 5 – Дата звернення: 21.04.2026.

⁴² Директива Ради 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року «Про якість води, призначеної для споживання людиною». (1998). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/994_963

Проаналізовано такі показники: загальна твердість, водневий показник, загальний солевміст, концентрація хлоридів, сульфатів, заліза, амонію, нітратів, нітритів, електропровідність. Під час відбору проб проводився аналіз органолептичних показників (запах, характерний колір, каламутність, осад, прозорість).

Слід відзначити, що загальна твердість води (рис. 4) є одним із важливих фізико-хімічних показників, що характеризує сумарну концентрацію іонів кальцію та магнію. Підвищений показник не лише погіршує органолептичні властивості води, зокрема смак і прозорість, але й може негативно впливати на здоров'я людини, а також знижувати ефективність і довговічність роботи побутового обладнання.

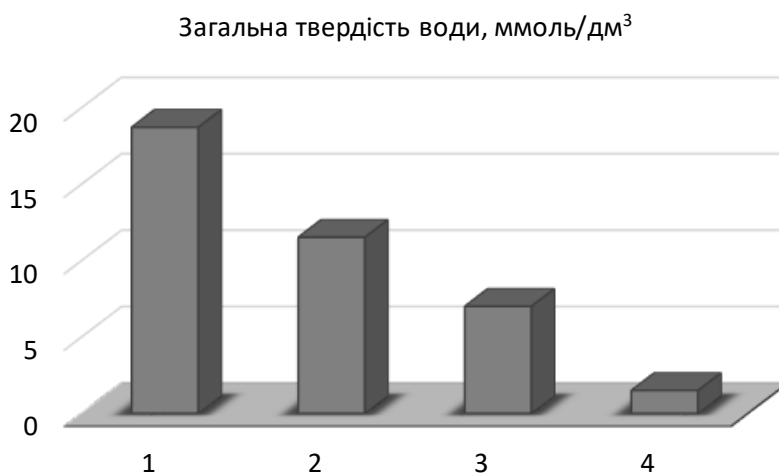


Рисунок 4. Загальна твердість води: 1 – колодязь в селі Комарівка Харківської області; 2 – колодязь в селі Підлиман Харківської області; 3 – вимоги до питної води ДСанПіН 2.2.4-171-10; 4 – вимоги до питної води згідно з Директивою Ради 98/83/ЄС

Згідно з результатами проведених досліджень, встановлено, що загальна твердість питної води з колодязів в с. Комарівка та Підлиман Харківської області не відповідає вимогам. Високий показник загальної твердості зафіксовано у с. Комарівка 18,72 ммоль/дм³, що суттєво перевищує допустимі значення за ДСанПіН 2.2.4-171-10 та Директиви Ради 98/83/ЄС. У воді з колодязя в с. Підлиман також є перевищення загальної твердості (11,52 ммоль/дм³) згідно з цими нормативами.

Слід відзначити, що без попередньої очистки питної води, споживати її не можна. Висока твердість води може викликати накопичення солей у трубопроводах, погіршувати смак води та негативно впливати на здоров'я людини при тривалому споживанні. Ці дослідження підкреслюють необхідність очищення води з колодязів до рівня, що відповідає як національним, так і європейським санітарним нормам. Результати також вказують на потребу у впровадженні локальних систем моніторингу та регулювання твердості води в сільських районах Харківської області.

Водневий показник (рН) є важливим інтегральним показником, що характеризує кислотно-лужні властивості води. На рисунку 5 наведено порівняльну оцінку рівня рН води з колодязів у селах Комарівка та Підлиман Харківської області з нормативами, передбаченими українськими та європейськими стандартами.

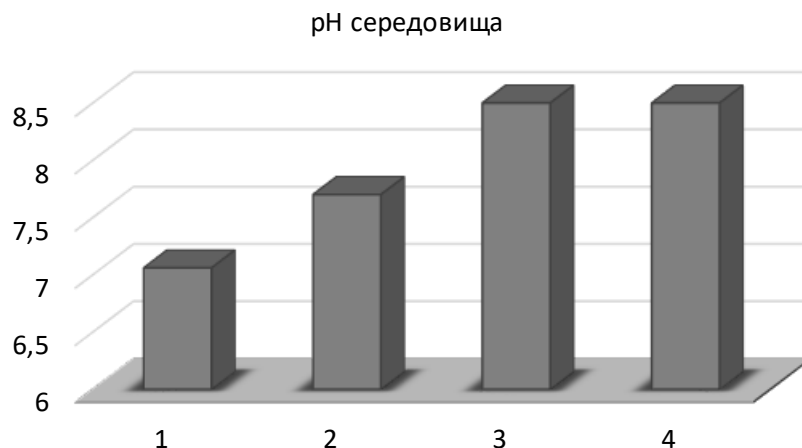


Рисунок 5. Водневий показник (pH): 1 – колодязь в селі Комарівка Харківської області; 2 – колодязь в селі Підлиман Харківської області; 3 – вимоги до питної води ДСанПіН 2.2.4-171-10; 4 – вимоги до питної води згідно з Директивою Ради 98/83/ЄС

Встановлено, що у зразку води з с. Комарівка рН становить 7,06, а в с. Підлиман Харківської області 7,7, що відповідає нормативам як ДСанПіН 2.2.4-171-10 так і Директиви Ради ЄС 98/83/ЄС.

Важливим показником, при оцінці якості питної води, також є загальний солевміст (мінералізація), що характеризує сумарну концентрацію розчинених неорганічних речовин, а саме солей кальцію, магнію, натрію, хлоридів, сульфатів та карбонатів. Підвищена мінералізація може негативно впливати на здоров'я людини (серцево-судинну систему, порушення водно-сольового балансу та роботу нирок). На рис. 6 наведено порівняльну оцінку мінералізації у воді з різних колодязів селищ Камарівка та Підлиман Харківської області, а також нормативні межі згідно з українськими та європейськими нормами.

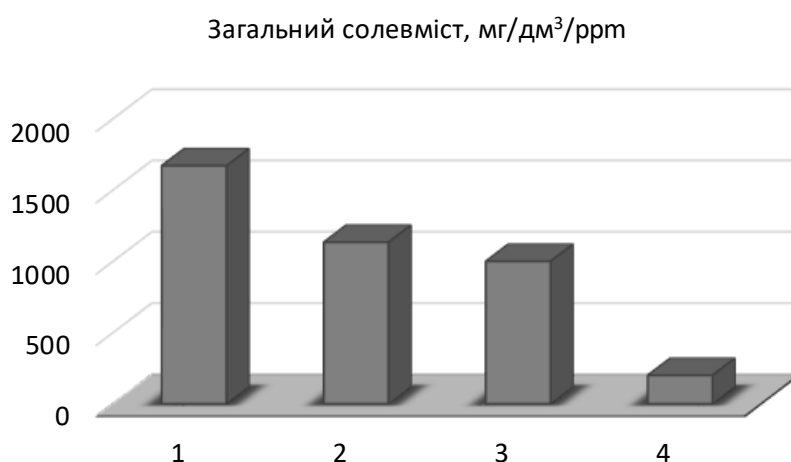


Рисунок 6. Загальний солевміст: 1 – колодязь в селі Комарівка Харківської області; 2 – колодязь в селі Підлиман Харківської області; 3 – вимоги до питної води ДСанПіН 2.2.4-171-10; 4 – вимоги до питної води згідно з Директивою Ради 98/83/ЄС

Слід відзначити, що, згідно з рис. 6, загальний солевміст не відповідає нормативам. У зразку 1 (колодязь в селі Комарівка Харківської області) становить 1670 мг/дм³/ppm, що в декілька разів перевищує вимоги до питної води згідно з Директивою Ради 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року, а також вимоги до питної води ДСанПіН 2.2.4-171-10. Мінералізація води з колодязі в с. Підлиман

становить 1134 мг/дм³/ppm, що також не відповідає вимогам до питної води ДСанПіН 2.2.4-171-10, які затверджені в Україні та вимогам до питної води згідно Директиви Ради 98/83/ЄС.

При дослідженні якості питної води у сільській місцевості, важливим показником є вміст нітратів у питній воді. Підвищена концентрація нітратів у воді може спричиняти негативні наслідки для здоров'я людей, зокрема у дітей та осіб з ослабленим імунітетом. На рисунку 7 наведено результати вимірювання концентрації нітратів у зразках води з колодязів двох сіл Харківської області, а також порівняння їх з національними та європейськими нормативами якості питної води.



Рисунок 7. Концентрація нітратів: 1 – колодязь в селі Комарівка Харківської області; 2 – колодязь в селі Підлиман Харківської області; 3 – вимоги до питної води ДСанПіН 2.2.4-171-10; 4 – вимоги до питної води згідно з Директивою Ради 98/83/ЄС

Досліджено зразки води з колодязів у селах Комарівка та Підлиман Харківської області. У селі Комарівка концентрація нітратів становила 11,2 мг/дм³, а в с. Підлиман – 6,3 мг/дм³, що не перевищує допустимі нормативи і вода відповідає, відносно цього показника, санітарним нормам.

Слід відзначити, що нітрати проявляють токсичну дію шляхом часткового перетворення в шлунково-кишковому тракті людини в нітрити – сполуки з більш вираженим токсичним впливом. Нітрити здатні окислювати гемоглобін до метгемоглобіну, що порушує транспортування кисню кров'ю та призводить до гіпоксії тканин. Споживання питної води, яка забруднена нітратами, є особливо небезпечним для дітей. Нітрати не мають кольору, запаху, смаку. Проведені дослідження показали, що вміст нітритів у даних зразках не виявлено.

Показник електропровідності не нормується нормативами для питної води, однак має важливе значення з точки зору технічного стану водопровідних систем (рис. 8). Підвищене значення електропровідності може спричиняти розвиток корозії металевих елементів трубопроводів. Усі проаналізовані зразки води характеризуються підвищеною електропровідністю, що перевищує рекомендовані рівні для оптимальної експлуатації інженерних мереж.

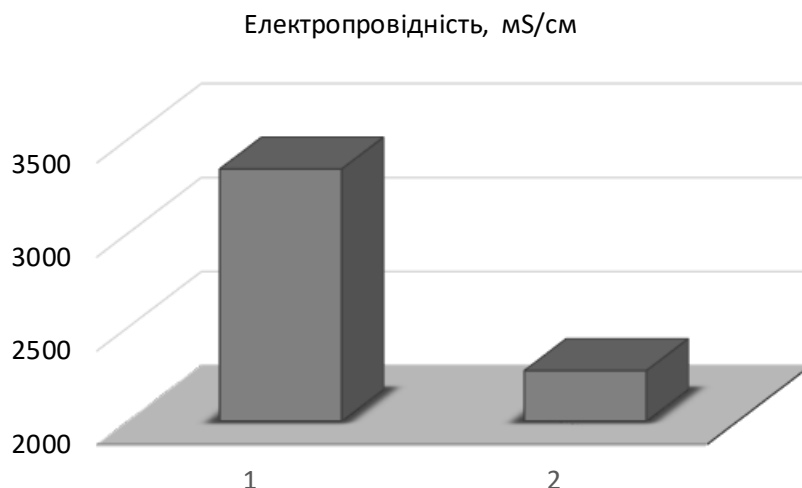


Рисунок 8. Електропровідність: 1 – колодязь в селі Комарівка Харківської області; 2 – колодязь в селі Підлиман Харківської області

Зразки води відібрані із колодязів с. Комарівка та с. Підлиман Харківської області досліджувалися на вміст хлоридів, сульфатів, амонію, марганцю та загального заліза.

Встановлено дещо підвищену концентрацію амонію у воді, а це може свідчити про вміст органічних залишків чи побутових стоків у питній воді. Цей показник відповідає нормативам згідно з національними та європейськими стандартами якості води.

У відібраних зразках води з колодязів не виявлено підвищеного вмісту хлоридів та сульфатів, що може свідчити про відсутність забруднення води солями хлорної та сірчаної кислоти, надлишок цих іонів може зумовлювати гіркий присмак води, негативно впливати на здоров'я людей та спричиняти корозію трубопроводів.

В досліджуваних пробах води не виявлено надлишкових концентрацій заліза.

Для оцінки якості питної води з колодязів селищ Комарівка і Підлиман Харківської області використано Національний стандарт України ДСТУ 4808:2007, згідно з яким визначено класи якості води для кожного об'єкта дослідження за окремими показниками (рис. 9).

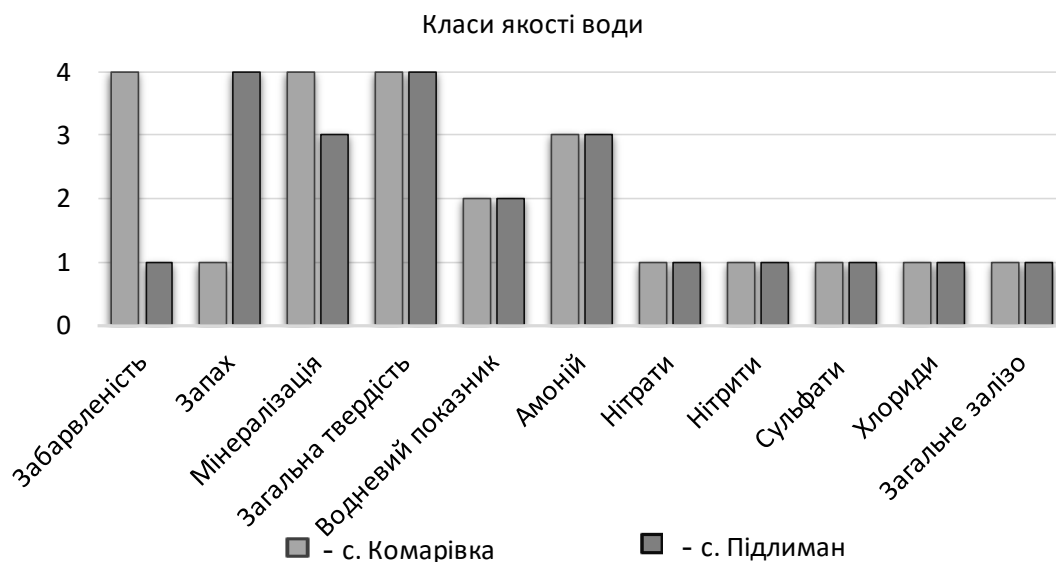


Рисунок 9. Класи якості води за окремими показниками

Національний стандарт ДСТУ 4808:2007 передбачає розподіл за класами якості води від 1 (відмінна, бажана якість води) до 4 класу (посередня, обмежено придатна, небажана якість води).

Досліджено, що в с. Комарівка Харківської області вода з колодязів належить до четвертого класу якості води, за такими показниками, як забарвленість, мінералізація, загальна твердість, також підвищений вміст амонію. У с. Підлиман такі показники, як запах і загальна твердість належать до четвертого класу якості води, а мінералізація, вміст амонію та водневий показник належать до третього та другого класу якості води відповідно. Вміст нітратів, нітритів, сульфатів та хлоридів в обох населених пунктах відповідає дуже добрій якості води.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що якість питної води з колодязів у селищах Комарівка та Підлиман Харківської області не повністю відповідає санітарно-гігієнічним нормативам^{43,44}, зокрема за показниками загальної твердості та мінералізації. Отримані результати свідчать про обмежену придатність води до споживання без попереднього очищення та необхідність впровадження сучасних методів очищення. З метою покращення якості питної води доцільно рекомендувати використання побутових систем фільтрації та установок зворотного осмосу. Важливим заходом є також організація регулярного моніторингу фізико-хімічних показників води у децентралізованих джерелах водопостачання.

5. ВИСНОВКИ

У роботі проведено комплексне дослідження фізико-хімічних показників якості питної води з колодязів у с. Комарівка та Підлиман Харківської області в умовах воєнних дій, а також здійснено їх порівняльний аналіз відповідно до чинних нормативів.

Розглянуто основні теоретичні аспекти якості питної води та її значення для здоров'я населення. Проаналізовано основні джерела забруднення водних джерел і встановлено, що найбільший вплив мають антропогенні чинники та наслідки воєнних дій. Визначено, що колодязі як децентралізовані джерела водопостачання є найбільш вразливими до забруднення.

Проведено комплексну оцінку якості питної води з колодязів досліджуваних населених пунктів. Досліджено такі фізико-хімічні показники: загальна твердість, водневий показник (рН), загальний солевміст, концентрації хлоридів, сульфатів, заліза, амонію, нітратів, нітритів та електропровідність, що дозволило об'єктивно оцінити стан води та її відповідність санітарно-гігієнічним нормативам.

Встановлено, що у с. Комарівка значення загальної твердості становить 18,72 ммоль/дм³, а мінералізації – 1670 мг/дм³, що перевищує вимоги до питної води ДСанПіН 2.2.4-171-10 та вимоги Директиви Ради 98/83/ЄС. У с. Підлиман відповідні показники становлять 11,52 ммоль/дм³ та 1134 мг/дм³, що також перевищує нормативні значення. Слід відзначити, що концентрації нітратів, нітритів, амонію, сульфатів, хлоридів і заліза перебувають у межах допустимих норм, що свідчить про відсутність критичного органічного та токсичного забруднення.

За результатами оцінювання якості води відповідно до вимог ДСТУ 4808:2007 визначено, що досліджувана вода належить до III-IV класів якості води, що характеризує її як обмежено придатну для питного використання без попереднього очищення.

Отже, проведені дослідження підтверджують критичну ситуацію з якістю питної води в сільській місцевості Харківської області, яка зумовлена не лише природними факторами, а й наслідками воєнних дій. Наявні ризики для здоров'я населення потребують негайного реагування, включаючи впровадження систем локального очищення води, забезпечення доступу до альтернативних джерел, а також постійного моніторингу якості питної води.

⁴³ Хром'як У.В., Мільчаковський І.М. Військові дії в Україні як чинник утворення відходів. *XVII Міжнародна науково-методична конференція "БЕЗПЕКА ЛЮДИНИ У СУЧАСНИХ УМОВАХ"*. 4-5 грудня 2025 р.: тези допов. Харків: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". 2025. С. 47-49.

⁴⁴ Хром'як У.В., Мільчаковський І.М. Фізико-хімічні показники питної води у колодязях селищ Комарівка та Підлиман Харківської області. *Міжнародну науково-практичну конференцію «Problems of Emergency Situations»*. 21 травня 2026 р.: тези допов. Черкаси: Національний університет цивільного захисту України. 2026. С. 215.

РОЗДІЛ 2. БІОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ГРОМАДСЬКЕ ЗДОРОВ'Я В УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ

CHAPTER 2. BIOLOGICAL SAFETY AND PUBLIC HEALTH IN WARTIME

CHANGES IN THE SOIL MICROBIOME OF A MILITARY TRAINING GROUND

ЗМІНИ МІКРОБІОМУ ҐРУНТІВ НАВЧАЛЬНОГО ВІЙСЬКОВОГО ПОЛІГОНУ

Solomiia Komplikevych, PhD in Biology, Ivan Franko National University of Lviv, solomiia.komplikevych@lnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9774-7113>

Olha Maslovska, PhD in Biology, Associate Professor, Ivan Franko National University of Lviv, olha.maslovska@lnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0177-1419>

Andriy Hnatush, PhD in Biology, Security Service of Ukraine, andrew.gnatush@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7237-3913>

Yeva Zaritska, State Research Control Institute of Veterinary Medicinal Products and Feed Additives, eva7e7@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6963-5560>

Oleksiy Telehuz, PhD in Geography, Associate Professor, Ivan Franko National University of Lviv, oleksiy.telehuz@lnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7828-634X>

Svitlana Hnatush, PhD in Biology, Professor, Ivan Franko National University of Lviv, svitlana.hnatush@lnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5353-102X>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.08>

Abstract. An analysis of the heavy metal content in the soil samples taken from the military training ground revealed that the maximum permissible concentrations for Cu, Cr, and Zn had been exceeded. The levels of other metals in the soils studied were within acceptable limits. As a result of the ammunition explosions, metals such as Cu, Cr, Hg, and Se were released into the soil, as the concentration of these metals in the sample taken from the craters was statistically higher than in the soil sample taken from areas without visible signs of damage. In particular, copper levels increased 2.4-fold ($p < 0.001$), chromium levels 8.3-fold ($p < 0.001$), mercury levels 4.0-fold ($p = 0.015$), and selenium levels 2.1-fold ($p = 0.001$). No statistically significant differences in the content of other metals were found between the samples. Among the 10 most abundant families identified in the metagenome of the soils sampled from the military training ground, the relative abundance of *Mycobacteriaceae* was 3.06 times higher in soil samples from craters (ranging from 0.81% in a sample of undamaged soil to 2.49% in soil from a crater). An increase was also observed in the proportion of sequences identified as belonging to the families *Xanthobacteraceae* (1.87-fold), *Micrococcaceae* (1.13-fold) and *Solirubrobacteraceae* (1.08-fold). In contrast, a sharp decline was observed in the relative abundance of the *Nitrososphaeraceae* family, whose proportion in the crater sample decreased by 18.23-fold (from 3.48% to 0.19%). In addition, there was a decrease in the proportion of families such as 67-14 (2.38-fold), *Gemmatimonadaceae* (1.72-fold), *Nocardioidaceae* (1.45-fold), *Streptomyacetaceae* (1.4-fold) and *Pseudomonadaceae* (1.29-fold). Among the 10 most abundant genera identified in the metagenome of the studied soils, the relative abundance of sequences identified as members

of the genus *Candidatus Solibacter* was 3.23 times higher (from 0.46% in a soil sample without visible damage to 1.50% in a soil sample from a crater), and *Mycobacterium* was 3.06 times higher (from 0.82% to 2.49%, respectively). The proportion of sequences belonging to the genera *Bradyrhizobium* (2.60 times higher) and *Candidatus Udaeobacter* (2.25 times higher) was also greater. In contrast, the sample from the crater showed a decline in the relative abundance of several taxa, particularly the genus *RB41*, whose proportion decreased 3.29-fold (from 1.87% to 0.57%). In addition, there was a decrease in the relative abundance of genera such as *Pseudonocardia* (2.45-fold), *Gaiella* (2.28-fold), *Streptomyces* (1.75-fold), *Nocardioides* (1.51-fold), and *Pseudomonas* (1.29-fold).

Keywords: impact of hostilities, soil composition, soil microbiome.

Анотація. У результаті аналізу вмісту важких металів у досліджених зразках ґрунту з навчального військового полігону виявлено перевищення ГДК для Cu, Cr, Zn. Вміст інших металів у досліджених ґрунтах був у допустимих межах. У результаті вибухів боєприпасів у ґрунт потрапляли такі метали, як Cu, Cr, Hg, Se, оскільки вміст цих металів у зразку з вирв був статистично вищим, порівняно зі зразком ґрунту без видимих ознак руйнування. Зокрема, вміст купрумів зростав у 2,4 рази ($p < 0,001$), хрому – у 8,3 рази ($p < 0,001$), ртуть – у 4,0 рази ($p = 0,015$), селену – у 2,1 рази ($p = 0,001$). Не виявлено статистично значущих відмінностей вмісту інших металів між зразками. Серед 10-ти найчисельніших родин, ідентифікованих у метабеномі досліджених ґрунтів з навчального військового полігону, у зразках з вирв відносна чисельність представників родини *Mycobacteriaceae* була вищою у 3,06 рази (з 0,81 % у зразку без видимих ознак руйнування до 2,49 % у вирві). Також спостерігали зростання частки послідовностей, ідентифікованих як представники родин *Xanthobacteraceae* (у 1,87 рази), *Micrococcaceae* (у 1,13 рази) та *Solirubrobacteraceae* (у 1,08 рази). Натомість зафіксовано різке зниження відносної чисельності родини *Nitrososphaeraceae*, частка якої у зразку з вирв зменшилася у 18,23 рази (з 3,48 % до 0,19 %). Окрім того, знизилася частка таких родин, як 67-14 (у 2,38 рази), *Gemmatimonadaceae* (у 1,72 рази), *Nocardioidaceae* (у 1,45 рази), *Streptomycetaceae* (у 1,4 рази) та *Pseudomonadaceae* (у 1,29 рази). Серед 10-ти найчисельніших родів, ідентифікованих у метабеномі досліджених ґрунтів, у зразках з вирв суттєво більшою була відносна чисельність послідовностей, ідентифікованих як представники родів *Candidatus Solibacter* – у 3,23 рази (з 0,46 % у зразку без видимих ознак руйнування до 1,50 % у зразку з вирв) та *Mycobacterium* – у 3,06 рази (з 0,82 % до 2,49 % відповідно). Також більшою була частка послідовностей представників родів *Bradyrhizobium* (у 2,60 рази) та *Candidatus Udaeobacter* (у 2,25 рази). Натомість у зразку з вирв зафіксовано зниження відносної чисельності низки таксонів, зокрема роду *RB41*, частка якого зменшилася у 3,29 рази (з 1,87 % до 0,57 %). Окрім того, знизилася відносна чисельність представників таких родів, як *Pseudonocardia* (у 2,45 рази), *Gaiella* (у 2,28 рази), *Streptomyces* (у 1,75 рази), *Nocardioides* (у 1,51 рази) та *Pseudomonas* (у 1,29 рази).

Ключові слова: вплив військових дій, мікробіом ґрунту, склад ґрунту.

INTRODUCTION

Armed conflicts are one of the key factors in human-induced ecosystem disruption, as they lead to soil degradation, loss of biodiversity, water pollution, and adverse effects on the climate system^{1,2}. The Russian-Ukrainian war is leading to a significant deterioration in the state of the environment and a rise in

¹ M Solokha, O Demyanyuk, L Symochko, S Mazur, N Vynokurova, K Sementsova and R Mariychuk, 'Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine' (2024) 13(10) *Land* 1614 <https://doi.org/10.3390/land13101614>.

² Державна екологічна інспекція України, 'Збитки довкіллю внаслідок збройної агресії РФ: актуальна інформація' (ДЕІ, 2026) <https://www.dei.gov.ua/> accessed 19 May 2026.

greenhouse gas emissions across Europe, with Ukraine bearing the greatest environmental burden³. Over the past century, large-scale armed conflicts have had a significant impact not only on the socio-economic development of nations, but also on the functioning of the planet's natural systems⁴. The cumulative impact of military operations creates additional obstacles to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs) and implementing strategies for the conservation and sustainable use of soil resources in the context of food security⁵. The SDGs in the field of biodiversity are proving difficult to achieve at the regional level in Ukraine, Russia, neighboring countries, and the countries of the European Union. They are influenced at both the local (e.g. SDG 3 – Good Health and Well-being; SDG 4 – Quality Education) and global (e.g. SDG 2 – Zero Hunger) levels. Undoubtedly, the Russian-Ukrainian armed conflict has global implications for the economic SDGs⁶.

The use and disposal of explosives in the military and mining sectors are among the main sources of soil contamination, posing a threat to the environment and human health⁷. The most commonly used explosive organic compounds are 2,4,6-trinitrotoluene (TNT), hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX), and octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (HMX). Once released into the environment, these compounds—along with toxic gases, munitions debris, fuel and lubricants, and the remains of military equipment—contribute to the degradation of ecosystems. Consequently, combat zones, military training grounds, and ammunition disposal sites are regarded as the primary sources of man-made pollution of terrestrial ecosystems^{8,9}.

It has been established that soil in military areas can remain contaminated with toxic compounds for decades. The main contaminants identified include antimony (Sb), lead (Pb), uranium (U), 2,4-dinitrotoluene, TNT, RDX, and other toxic substances^{10,11}. Most of them are highly resistant to degradation, which contributes to their accumulation in the biosphere and the emergence of long-term environmental risks¹². The migration of heavy metals (Pb, Cu, Cd, Sb, Cr, Ni, Zn) into water bodies and their accumulation in plants, invertebrates, and vertebrates also poses a significant danger^{13, 14}. High concentrations of toxic

³ I Appiah-Otoo and X Chen, 'Russian-Ukrainian war degrades the total environment' (2023) 16 *Letters in Spatial and Resource Sciences* 32.

⁴ Imperial War Museums, 'Timeline of 20th and 21st century wars' (IWM, 2024) <https://www.iwm.org.uk/history/timeline-of-20th-and-21st-century-wars> accessed 19 May 2026.

⁵ T Ben Hassen and H El Bilali, 'Impacts of the Russia-Ukraine war on global food security: Towards more sustainable and resilient food systems?' (2022) 11 *Foods* 2301.

⁶ P Pereira, W Zhao, L Symochko, M Inacio, I Bogunovic and D Barcelo, 'The Russian-Ukrainian armed conflict will push back the sustainable development goals' (2022) 3 *Geography and Sustainability* 277.

⁷ FJ Flores, E Mena, S Granda and J Duchicela, 'Microbial community composition of explosive-contaminated soils: A metataxonomic analysis' (2025) 13(2) *Microorganisms* 453 <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020453>.

⁸ RC Wilhelm, JP Amsili, KSM Kurtz, HM van Es and DH Buckley, 'Ecological insights into soil health according to the genomic traits and environment-wide associations of bacteria in agricultural soils' (2023) 3 *ISME Communications* 1.

⁹ CPB de Mesquita, L Vimercati, D Wu, MK Childress, A Danz, AC Grupe, D Haelewaters, NM Hyde, T Kossmann, C Oliver et al, 'Fungal diversity and function in metagenomes sequenced from extreme environments' (2024) 72 *Fungal Ecology* 101383.

¹⁰ M Solokha, O Demyanyuk, L Symochko, S Mazur, N Vynokurova, K Sementsova and R Mariychuk, 'Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine' (2024) 13(10) *Land* 1614 <https://doi.org/10.3390/land13101614>.

¹¹ C Fernandez-Lopez, R Posada-Baquero and J-J Ortega-Calvo, 'Nature-based approaches to reducing the environmental risk of organic contaminants resulting from military activities' (2022) 843 *Science of the Total Environment* 157007.

¹² C Fernandez-Lopez, R Posada-Baquero and J-J Ortega-Calvo, 'Nature-based approaches to reducing the environmental risk of organic contaminants resulting from military activities' (2022) 843 *Science of the Total Environment* 157007.

¹³ A Kicińska, R Pomykała and M Izquierdo-Diaz, 'Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils' (2022) 73 *European Journal of Soil Science* e13203.

¹⁴ L Gnatyshyna, V Khoma, V Martynyuk, T Matskiv, V Pedrini-Martha, M Niederwanger, O Stoliar and R Dallinger, 'Sublethal cadmium exposure in the freshwater snail *Lymnaea stagnalis* meets a deficient, poorly responsive metallothionein system while evoking oxidative and cellular stress' (2023) 263 *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* 109490 <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109490>

chemical compounds disrupt the physiological and biochemical processes of living organisms; in particular, they inhibit the vital functions of microorganisms^{15,16}.

In recent years, there has been a significant increase in studies examining the environmental consequences of military operations in Ukraine, particularly the impact of armed aggression on soil cover and the assessment of damage to land resources^{17,18}. The scientific literature suggests identifying a new type of soil degradation – degradation caused by armed aggression, which encompasses mechanical, physical, chemical, physico-chemical, and biological change¹⁹. Despite the issue's relevance, comprehensive studies of the multifaceted impact of military operations on soil ecosystems remain insufficient.

One promising approach to remediation of contaminated sites is natural attenuation, which relies on the ability of physical, chemical, and biological processes to reduce the concentrations of toxic substances in soil. Microorganisms, particularly bacteria and fungi, play a key role in these processes by transforming or degrading toxic compounds²⁰. These compounds are susceptible to degradation by *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Arthrobacter*, and *Acinetobacter* bacteria, some of which are associated with *Arabidopsis* and *Populus* root²¹. In addition, certain representatives of the *Ascomycota* and *Basidiomycota*, as well as the genera *Aspergillus*, *Fusarium*, and *Mortierella*, are considered promising agents for bioremediation^{22,23}. Transgenic *Arabidopsis* plants, modified with the AfSSB gene from the bacterium *Acidithiobacillus ferrooxidans*, demonstrate increased tolerance to TNT and cobalt and improved phytoremediation efficiency²⁴.

At the same time, the impact of explosives significantly alters the structure of soil microbial communities, reducing their diversity and functional activity. Analysis of alpha diversity showed that bacterial diversity was significantly higher in uncontaminated root and soil samples, whereas fungal diversity did not differ significantly between sites. An analysis of beta-diversity revealed that location, year, and sample type significantly influenced microbial community structure, with location being the most influential factor. Microbial taxa with differential distribution, including bacteria such as *Pseudarthrobacter* and fungi such as *Paraleptosphaeria* and *Talaromyces*, may contribute to natural degradation processes in soils contaminated with explosives²⁵.

¹⁵ M Solokha, O Demyanyuk, L Symochko, S Mazur, N Vynokurova, K Sementsova and R Mariychuk, 'Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine' (2024) 13(10) *Land* 1614 <https://doi.org/10.3390/land13101614>.

¹⁶ O Maslovska, S Komplikevych and S Hnatush, 'Oxidative stress and protection against it in bacteria' (2023) 17(2) *Studia Biologica* 153 <https://doi.org/10.30970/sbi.1702.716>.

¹⁷ А Сплодитель, О Голубов, С Чумаченко та Л Сорокіна, 'Вплив війни Росії проти України на стан українських ґрунтів' (Звіт, Громадська організація «Центр екологічних ініціатив "Екодія"» 2023) <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii2.pdf>

¹⁸ МБ Галкін, ІВ Страшнова та АВ Андрющенко, 'Використання мікроорганізмів у біоремедіації ґрунтів, забруднених внаслідок бойових дій' (2024) 2(61) *Мікробіологія і біотехнологія* 28 [https://doi.org/10.18524/2307-4663.2024.2\(61\).310553](https://doi.org/10.18524/2307-4663.2024.2(61).310553).

¹⁹ СА Балюк, АВ Кучер, МО Солоха та ВБ Соловей, 'Оцінювання впливу збройної агресії РФ на ґрунтовий покрив України' (2024) 1 *Ukrainian Geographical Journal* 7 <https://doi.org/10.15407/ugz2024.01.007>.

²⁰ FJ Flores, E Mena, S Granda and J Duchicela, 'Microbial community composition of explosive-contaminated soils: A metataxonomic analysis' (2025) 13(2) *Microorganisms* 453 <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020453>.

²¹ FJ Flores, E Mena, S Granda and J Duchicela, 'Microbial community composition of explosive-contaminated soils: A metataxonomic analysis' (2025) 13(2) *Microorganisms* 453 <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020453>.

²² FH Crocker, CM Jung, KJ Indest, SJ Everman and MR Carr, 'Effects of chitin and temperature on sub-Arctic soil microbial and fungal communities and biodegradation of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) and 2,4-dinitrotoluene (DNT)' (2019) 30 *Biodegradation* 415.

²³ F Ye, D Gong, C Pang, J Luo, X Zeng and C Shang, 'Analysis of fungal composition in mine-contaminated soils in Hechi City' (2020) 77 *Current Microbiology* 2685.

²⁴ JJ Gao, RH Peng, B Zhu, YS Tian, J Xu, B Wang, XY Fu, HJ Han, LJ Wang, FJ Zhang et al, 'Enhanced phytoremediation of TNT and cobalt co-contaminated soil by AfSSB transformed plant' (2021) 220 *Ecotoxicology and Environmental Safety* 112407.

²⁵ FJ Flores, E Mena, S Granda and J Duchicela, 'Microbial community composition of explosive-contaminated soils: A metataxonomic analysis' (2025) 13(2) *Microorganisms* 453 <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020453>.

The aim of our study was to characterize the microbiomes of areas damaged by explosions and areas with no visible damage within the military training ground, and to determine changes in the physico-chemical and granulometric composition of these soils.

METHODOLOGY

2.1. Subject of the study and sampling procedure

For the analysis, a site was selected within the Yavoriv military training ground district (Lviv region, Ukraine). Soil samples were taken directly from the site of the artillery firing (craters) and from an area located 50 meters from the craters, without any visible damage. Soil samples were collected in March 2024. At each site, samples were taken from five points (at a depth of 0–10 cm) using the diagonal method; these were thoroughly mixed to produce a representative composite sample in accordance with current standards²⁶. The samples were transported and stored at 8 ± 2 °C in thermal containers, and genetic analysis began no later than 48 hours after collection.

2.2. Analysis of the physical and chemical properties of soil

Soil moisture was determined by drying samples at 105 ± 2 °C until constant weight was reached. Particle size analysis was performed using the pipette method (Kachinsky modification), with a 4% sodium pyrophosphate solution for particle digestion²⁷. The humus content was determined using the Tyurin method (Nikitin modification), which involves oxidation with potassium dichromate in an acidic medium, followed by spectrophotometric measurement at 590 nm. The carbon content was calculated using a calibration curve based on a standard glucose solution. The mass fraction of humus in the soil was obtained by multiplying the carbon content (in %) by a factor of 1.724²⁸. The values for active and metabolic acidity (pH) were measured potentiometrically in aqueous and salt (KCl) suspensions²⁹. The total amount of absorbed bases was determined using the Kappen-Gilkovich method.

The concentrations of heavy metals and metalloids (Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Pb, Se, Hg, Zn, As) were measured using atomic absorption spectrophotometry on a Varian Zeeman AA240Z equipped with a GTA 120 graphite furnace (Made in Australia) under the conditions specified in Table 1. For sample preparation, the wet acid digestion method was used in sealed autoclaves. Soil samples were mineralized in a 'START D' (Milestone, Italy) using a mixture of concentrated HNO₃ (Merck, Millipore) and deionized water (Milli-Q, Millipore) under a stepwise heating program (up to 195 °C). After cooling, the resulting hydrolysates were quantitatively transferred to volumetric flasks, made up to 25 ml with deionized water, and, where necessary, diluted with 1 % HNO₃ to concentrations within the working range of the calibration curves.

Table 1

Parameters of heavy metals determination

	Wavelength of absorption (resonance) lines, nm	Argon flow was, L/min	Voltage of resonance radiation lamp, mA	Slit width, nm	The temperature of ashing stage, °C	The temperature of atomization stage, °C
Mn	279.5	0.3	10	0.2	+700	+2400
Cu	327.4	0.3	10	0.5	+800	+2300
Zn	307.6	0.3	9	1.0	+300	+1900

²⁶ DSTU ISO 10381–2:2004. *Soil quality — Sampling — Part 2: Guidance on sampling techniques* (State Housing and Municipal Economy Committee of Ukraine 2004).

²⁷ DSTU ISO 11464–2007. *Soil quality — Pretreatment of samples for physico-chemical analysis* (State Consumer Standard of Ukraine 2007).

²⁸ DSTU ISO 14235:2005. *Soil quality — Determination of organic carbon by sulfochromic oxidation* (State Consumer Standard of Ukraine 2005).

²⁹ DSTU ISO 10390:2022. *Soil quality — Determination of pH* (State Agency for Standardisation of Ukraine 2022).

Continued from Table 1

	Wavelength of absorption (resonance) lines, nm	Argon flow was, L/min	Voltage of resonance radiation lamp, mA	Slit width, nm	The temperature of ashing stage, °C	The temperature of atomization stage, °C
Cr	357.9	0.3	10	0.2	+1000	+2600
Se	196.0	0.3	8	1.0	+1000	+2600
Cd	228.8	0.3	10	0.5	+250	+1800
Pb	283.3	0.3	10	0.5	+400	+2100
Hg	253.6	-	10	9	+200	+550

2.3. Isolation of metagenomic DNA and PCR amplification

Total DNA was extracted from 100 mg soil samples using the commercial DNeasy PowerSoil Pro Kit (Qiagen). The quality and concentration of the isolated genetic material were assessed using a fluorescence-based method (Denovix) and by visualization in an agarose gel.

The target regions of the 16S rRNA gene (the V3–V4 region) were amplified using the specific primers 341F and 806R. The reaction was carried out using high-precision Q5 DNA polymerase according to an optimized temperature protocol: initial denaturation (98 °C, 2 min), 20 amplification cycles, and final extension. The purified amplicons (QIAquick Gel Extraction Kit) were used to prepare libraries by ligating individual barcodes.

2.4. Sequencing and bioinformatic data analysis

High-throughput sequencing of the prepared libraries was performed on the Illumina MiSeq platform (2×250 bp) at a target read depth of 100,000 sequences per sample. Initial data processing (demultiplexing and removal of technical sequences) was carried out using the Cutadapt software. The FLASH and vsearch tools were used to merge paired-end reads and filter out chimeric sequences. Sequence clustering into operational taxonomic units (OTUs) was performed using the UPARSE algorithm. The taxonomic classification and calculation of alpha-diversity metrics (Shannon, Simpson, and Chao1 indices) were performed using QIIME 1.9.1.

The metagenomic sequences have been deposited in the NCBI SRA as Bioproject “Microbiome of the Sand soil affected by military operations” (Accession: PRJNA1218905).

2.5. Statistical analysis

The results were analyzed mathematically to determine the mean values and standard deviation ($M \pm SD$). The statistical significance of differences between the samples was assessed using Student's t-test ($p \leq 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Changes in the physical, chemical composition, and particle size distribution of soils

Soil contamination resulting from the detonation of munitions is a complex, multi-component process involving the accumulation of both inorganic and organic toxicants^{30,31}. Military training grounds and combat zones are becoming ‘hotspots’ for the accumulation of potentially toxic elements and energetic

³⁰ H Zhang, Y Zhu, S Wang, S Zhao, Y Nie, X Liao, H Cao, H Yin and X Liu, ‘Contamination characteristics of energetic compounds in soils of two different types of military demolition range in China’ (2022) 295 *Environmental Pollution* 118654

³¹ A Rodríguez-Seijo, D Fernández-Calviño, M Arias-Estévez and D Arenas-Lago, ‘Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review’ (2024) 60 *Biology and Fertility of Soils* 813 <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>.

compounds. The main sources of contamination are products of shell casing fragmentation, the detonation of explosives, and the weathering of munitions remnants³².

Lead (Pb) is the most widely studied and relatively common inorganic contaminant identified in studies of the environmental impact of military operations, accounting for over 90% of the mass of most bullets and shells³³. Although it was long believed that lead remained inert, in soil it gradually oxidizes into mobile forms (Pb²⁺ or Pb⁴⁺), which become available to plants and microorganisms and therefore easily enter food chains³⁴.

In addition to lead, detonation of munitions releases metals such as antimony (Sb), used to harden alloys, as well as copper (Cu), zinc (Zn), cadmium (Cd), mercury (Hg), and arsenic (As). These elements enter the soil through the corrosion of fragments and the detonation of fuses, resulting in persistent contamination of the area³⁵. Studies at military firing ranges show that in areas where live-fire exercises occur, soil mercury concentrations can be 10 times higher than background levels³⁶.

Modern 'eco-friendly' ammunition often uses alternatives to lead, such as tungsten (W) and bismuth (Bi)³⁷. However, research shows that they are not inert: tungsten can be toxic to soil organisms, accumulate in plant biomass, and negatively impact microbial community structure³⁸.

Depleted uranium, which is widely used in the manufacture of armor-piercing shells, poses a particular danger³⁹. Its presence in soil following shell detonation significantly impairs the reproductive functions of soil fauna, particularly earthworms, and the level of its accumulation in organisms' tissues is directly dependent on its concentration in the soil⁴⁰.

Organic contamination is usually in the form of explosive compounds such as TNT, RDX, and HMX⁴¹. These substances enter the soil through leaks caused by detonation or the fragmentation of unexploded ordnance, resulting in long-term toxic effects^{42,43}. The highest levels of contamination are observed during low-order detonations, when a significant proportion of the explosive is dispersed into the

³² A Rodríguez-Seijo, D Fernández-Calviño, M Arias-Estévez and D Arenas-Lago, 'Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review' (2024) 60 *Biology and Fertility of Soils* 813 <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>.

³³ A Reigosa-Alonso, R Lorenzo Dacunha, D Arenas-Lago, FA Vega and A Rodríguez-Seijo, 'Soils from abandoned shooting range facilities as contamination source of potentially toxic elements: Distribution among soil geochemical fractions' (2021) 43 *Environmental Geochemistry and Health* 4283 <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00900-7>.

³⁴ P Sanderson, R Naidu, NS Bolan, M Bowman and S McLure, 'Effect of soil type on distribution and bioaccessibility of metal contaminants in shooting range soils' (2012) 438 *Science of the Total Environment* 452 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.014>.

³⁵ AJ Barker, JL Clausen, TA Douglas, AJ Bednar, CS Griggs and WA Martin, 'Environmental impact of metals resulting from military training activities: A review' (2021) 265 *Chemosphere* 129110 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129110>.

³⁶ A Rodríguez-Seijo, D Fernández-Calviño, M Arias-Estévez and D Arenas-Lago, 'Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review' (2024) 60 *Biology and Fertility of Soils* 813 <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>.

³⁷ P Sanderson, F Qi, B Seshadri, A Wijayawardena and R Naidu, 'Contamination, fate and management of metals in shooting range soils—a review' (2018) 4 *Current Pollution Reports* 175 <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0089-5>.

³⁸ AJ Kennedy, DR Johnson, JM Seiter, JH Lindsay, RE Boyd, AJ Bednar and PG Allison, 'Tungsten toxicity, bioaccumulation, and compartmentalization into organisms representing two trophic levels' (2012) 46 *Environmental Science & Technology* 9646 <https://doi.org/10.1021/es300606x>.

³⁹ AV Skalny, M Aschner, IP Bobrovniksky, P Chen, A Tsatsakis, MMB Paoliello, A Buha Djordjevic and AA Tinkov, 'Environmental and health hazards of military metal pollution' (2021) 201 *Environmental Research* 111568 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111568>.

⁴⁰ JK Stanley, JG Coleman, SM Brasfield, AJ Bednar and CY Ang, 'Environmental assessment of depleted uranium used in military armor-piercing rounds in terrestrial systems' (2014) 33 *Environmental Toxicology and Chemistry* 1308 <https://doi.org/10.1002/etc.2551>.

⁴¹ J Luo, Y Li, H Cao, Y Zhu, X Liu, H Li and Liao X, 'Variations of microbiota in three types of typical military contaminated sites: Diversities, structures, influence factors, and co-occurrence patterns' (2023) 443(B) *Journal of Hazardous Materials* 130290 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389422020842>.

⁴² J Luo, Y Li, H Cao, Y Zhu, X Liu, H Li and Liao X, 'Variations of microbiota in three types of typical military contaminated sites: Diversities, structures, influence factors, and co-occurrence patterns' (2023) 443(B) *Journal of Hazardous Materials* 130290 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389422020842>.

⁴³ H Zhang, Y Zhu, S Wang, S Zhao, Y Nie, X Liao, H Cao, H Yin and X Liu, 'Contamination characteristics of energetic compounds in soils of two different types of military demolition range in China' (2022) 295 *Environmental Pollution* 118654 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121022363>.

soil in its original form⁴⁴. Polycyclic aromatic hydrocarbons are also common contaminants at military sites⁴⁵. They may originate from fuel spills or be present in shooting targets that break apart during training, further compromising soil environmental conditions⁴⁶. Chemical warfare agents, such as mustard gas or polychlorinated biphenyls, are being detected in some military areas. A new type of contamination is perfluorinated and polyfluorinated substances, which are used in special munitions and are released as aerosols following an explosion⁴⁷. Areas where munitions are destroyed (by detonation or incineration) are the most heavily contaminated sites⁴⁸. In such areas, concentrations of energy-releasing compounds can be extremely high, and toxic residues can migrate to depths of up to 100 cm, posing a threat to groundwater⁴⁹.

Shell explosions and the movement of heavy machinery cause mechanical disturbance to the soil, known as “bombturbation”⁵⁰. This leads to changes in landscape structure, soil compaction, and disruption of natural nutrient cycles, which negatively impact underground biota⁵¹.

The particle-size distribution of soil plays a decisive role in munition fragmentation. When shells strike coarse-grained and stony soils, this results in significantly greater projectile fragmentation and metal abrasion⁵².

On the contrary, soils with a high clay content act as a ‘cushion’, minimising the deformation of projectiles and the depth to which they penetrate. Under such conditions, lead often remains in the form of large fragments, which limits the rate at which it weathers and transforms into soluble forms⁵³.

Silt and clay particles have the highest specific surface area, which facilitates the intensive adsorption of dissolved metals and organic toxins⁵⁴. This means that the finest soil particles are often the most toxic because they contain higher concentrations of accumulated pollutants⁵⁵.

Mechanical impact energy can pulverize the soil itself, particularly if it contains fragile materials such as dredged sand with shell fragments or mica. This artificially increases the proportion of fine particles, which are more easily carried by the wind as toxic dust⁵⁶.

⁴⁴ H Zhang, Y Zhu, S Wang, S Zhao, Y Nie, X Liao, H Cao, H Yin and X Liu, ‘Contamination characteristics of energetic compounds in soils of two different types of military demolition range in China’ (2022) 295 *Environmental Pollution* 118654 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121022363>

⁴⁵ A Rodríguez-Seijo, D Fernández-Calviño, M Arias-Estévez and D Arenas-Lago, ‘Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review’ (2024) 60 *Biology and Fertility of Soils* 813 <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>.

⁴⁶ A Rodríguez-Seijo, D Fernández-Calviño, M Arias-Estévez and D Arenas-Lago, ‘Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review’ (2024) 60 *Biology and Fertility of Soils* 813 <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>.

⁴⁷ BJ Ruyle, CP Thackray, CM Butt, DR LeBlanc, AK Tokranov, CD Vecitis and EM Sunderland, ‘Centurial persistence of forever chemicals at military fire training sites’ (2023) 57 *Environmental Science & Technology* 8096 <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00675>.

⁴⁸ A Rodríguez-Seijo, D Fernández-Calviño, M Arias-Estévez and D Arenas-Lago, ‘Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review’ (2024) 60 *Biology and Fertility of Soils* 813 <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>.

⁴⁹ J Luo, Y Li, H Cao, Y Zhu, X Liu, H Li and Liao X, ‘Variations of microbiota in three types of typical military contaminated sites: Diversities, structures, influence factors, and co-occurrence patterns’ (2023) 443(B) *Journal of Hazardous Materials* 130290 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389422020842>.

⁵⁰ PS Althoff, TC Todd, SJ Thien and MA Callahan, ‘Response of soil microbial and invertebrate communities to tracked vehicle disturbance in tallgrass prairie’ (2009) 43 *Applied Soil Ecology* 122 <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.06.011>.

⁵¹ PS Althoff, SJ Thien and TC Todd, ‘Primary and residual effects of Abrams tank traffic on prairie soil properties’ (2010) 74 *Soil Science Society of America Journal* 2151 <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0091>.

⁵² SL Larson, CL Teeter, VF Medina and WA Martin, *Treatment and management of closed or inactive small arms firing ranges* (U.S. Army Corps of Engineers 2019).

⁵³ D Dermatas and M Chrysoschoou, ‘Lead particle size and its association with firing conditions and range maintenance: Implications for treatment’ (2007) 29(4) *Environmental Geochemistry and Health* 347 <https://doi.org/10.1007/s10653-007-9092-2>.

⁵⁴ SL Larson, CL Teeter, VF Medina and WA Martin, *Treatment and management of closed or inactive small arms firing ranges* (U.S. Army Corps of Engineers 2019).

⁵⁵ K Gębka, J Beldowski and M Beldowska, ‘The impact of military activities on the concentration of mercury in soils of military training grounds and marine sediments’ (2016) *Environmental Science and Pollution Research* <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7436-0>.

⁵⁶ D Dermatas and M Chrysoschoou, ‘Lead particle size and its association with firing conditions and range maintenance: Implications for treatment’ (2007) 29(4) *Environmental Geochemistry and Health* 347 <https://doi.org/10.1007/s10653-007-9092-2>.

Vertical migration of contaminants following ruptures can be significant. Organic compounds and metals can penetrate to a depth of up to 100 cm, posing a risk of groundwater contamination, particularly in soils with high hydraulic conductivity⁵⁷.

Landfill management practices also influence the rate of weathering. For example, the use of water spraying to suppress dust at enclosed firing ranges can accelerate the corrosion of metal fragments and the formation of secondary minerals, such as cerussite (PbCO₃)⁵⁸.

The bioavailability of contaminants depends directly on their form: metals in the form of large fragments (shrapnel) have low bioavailability, but over time, they transform into more bioavailable ionic forms⁵⁹. This process is significantly influenced by soil pH and organic matter content⁶⁰.

Based on our analysis of soil samples taken from the crater and from a visually undamaged area within the military training ground, we have determined that the explosions affected the particle-size distribution (mechanical composition) of the soils examined. Physical mixing (pedoturbation processes of military origin) has altered the distribution of grain-size fractions, shifting it from coarse sand to silt. The greatest changes occurred in the silt content: from 0.4 to 0.8%; medium silt, from 1.2 to 2.4%; and clay, from 0.4 to 0.8% (Table 2). The clay content of soils damaged by explosions is slightly higher (3.2%) due to mixing with transitional, heavier illuvial horizons. To some extent, this increases the soil's mass-specific surface area, thereby affecting its physical and chemical properties, particularly its absorption capacity. In general, changes in particle-size distribution do not affect the classification of these soils; they remain sandy.

Table 2

Particle size distribution analysis of soil samples from a crater and from a visually undamaged area at a military training ground

Area	Particle size (mm), quantity (%)						The sum of particles less than 0.01 mm (fraction of clay) (%)	Soil name based on particle size distribution
	sand		silt			clay		
	1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001		
Without visible damage	38.2	52.2	6.8	1.2	0.8	0.8	2.8	Sandy
Crater	35.6	54.4	6.8	2.4	0.4	0.4	3.2	Sandy

The mechanical impact of the explosion altered the particle size distribution, which, in turn, affected the main physical and chemical properties. Specifically, the humus content decreased by 0.15% compared to the control; the hydrogen pH decreased by 0.7, while the salt pH increased by 0.3; accordingly, the hydrolytic acidity increased by 0.2 mg/eq/100 g of soil; the sum of absorbed bases decreased by 1.2 mg/eq/100 g of soil (Table 3).

⁵⁷ H Zhang, Y Zhu, S Wang, S Zhao, Y Nie, X Liao, H Cao, H Yin and X Liu, ‘Contamination characteristics of energetic compounds in soils of two different types of military demolition range in China’ (2022) 295 *Environmental Pollution* 118654 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121022363>.

⁵⁸ D Dermatas and M Chrysochoou, ‘Lead particle size and its association with firing conditions and range maintenance: Implications for treatment’ (2007) 29(4) *Environmental Geochemistry and Health* 347 <https://doi.org/10.1007/s10653-007-9092-2>.

⁵⁹ P Sanderson, R Naidu, NS Bolan, M Bowman and S McLure, ‘Effect of soil type on distribution and bioaccessibility of metal contaminants in shooting range soils’ (2012) 438 *Science of the Total Environment* 452 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.014>.

⁶⁰ A Rodríguez-Seijo, D Fernández-Calviño, M Arias-Estévez and D Arenas-Lago, ‘Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review’ (2024) 60 *Biology and Fertility of Soils* 813 <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>.

Table 3

Physical and chemical properties of soils from the crater and from a visually undamaged area within the military training ground

Area	The sum of particles less than 0.01 mm (fraction of clay) (%)	Humus, %	pH _{H2O}	pH _{KCl}	Hydrolytic acidity, mg-eq./100 g of soil	The amounts of adsorbed bases, mg-eq./100 g of soil
Without visible damage	2.8	0.65	7.5	7.2	0.35	2.0
Crater	3.2	0.52	6.8	7.5	0.53	0.8

The observed changes in the acid-base properties and particle-size distribution of the soils are primarily caused by mechanical soil disturbance and the thermodegradative effects of the explosion.

Analysis of the heavy metal content in the soil samples taken from the undamaged area and the crater revealed that the maximum permissible concentrations (MPCs) for soil were exceeded for Cu, Cr and Zn (Table 4). The levels of other metals in the soils studied were within acceptable limits. As a result of the munitions explosions, metals such as Cu, Cr, Hg and Se were introduced into the soil, as the concentration of these metals in the soil from the crater was statistically higher than in the soil from the nearby area. In particular, copper levels increased 2.4-fold ($p < 0.001$), chromium levels 8.3-fold ($p < 0.001$), mercury levels 4.0-fold ($p = 0.015$) and selenium levels 2.1-fold ($p = 0.001$). No statistically significant differences were found in the content of other metals compared with the soil from the undamaged area.

Table 4

Metal contents and contamination indices of the soil samples

Metal	Soil from the undamaged area	Soil from the crater	MPC ¹
	Metal content, mg·kg ⁻¹		
Cu	3.87±0.45	9.27±0.55***	3.0
Cr	11.1±1.1	91.6±2.9***	6.0
Zn	46.5±2.2	41.9±2.8	23.0
Pb	4.23±0.65	3.37±0.45	32.0
Cd	0.113±0.005	0.087±0.004**	1.5
As	1.69±0.05	1.83±0.06	2.0
Hg	0.0004±0.0001	0.0016±0.0002*	2.1
Mn	205.3±2.4	207.2±2.1	1500
Co	2.00±0.60	2.35±0.12	5.0
Se	0.22±0.03	0.47±0.04**	3.0

Note: ¹ Order of MHO of Ukraine № 1595 from 14.07.2020; * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$; *** – $p < 0.001$ – probable differences in metal content compared to the soil from the control area

The 8.2-fold increase in chromium (Cr) levels (to 91.6 mg/kg) and the 2.4-fold increase in copper (Cu) levels we detected in the soil of the military training ground demonstrate that the chemical load varies depending on the type of ammunition used. By way of comparison, in a similar study we conducted using soil samples taken in the Sumy region (the village of Rudak), we recorded a 2.3-fold increase in cadmium levels and a 2.1-fold increase in copper levels in the crater left by an 82-mm mortar shell⁶¹. In another study

⁶¹ O Maslovska, S Komplikevych, D Zinchuk, A Hnatysh, Y Zaritska, O Telehuz and S Hnatysh, 'Bacteriome of the soil affected by hostilities as a source of isolation of plant growth-promoting metal-resistant bacteria' (2025) 75(1) *Annals of Microbiology* <https://doi.org/10.1186/s13213-025-01807-9>.

of soil samples collected in the Sumy region, conducted by researchers from the Institute of Soil Protection of Ukraine, the average zinc (Zn) content was 3.9 times the background level, and the cadmium content was 1.4 times the background level. Furthermore, at the sites where aerial bombs had fallen, the lead content reached 113.5% of the maximum permissible concentration^{62, 63}. In the Lviv region (sites of missile strikes), researchers used ICP-OES chemical analysis to establish the following order of concentration: Cd > Cu > Pb > Cr > Zn > Ni⁶⁴. In the Kharkiv region, cadmium levels in some water samples exceeded background levels by 2–18 times, and lead levels by 2.6–22 times⁶⁵. The most critical levels were recorded in soil samples taken in the Luhansk region, where extreme concentrations of lead (up to 14,000 mg/kg) and copper (up to 330 mg/kg) were detected⁶⁶, which is significantly higher than our results in this study.

Such significant spatial variation in contamination confirms that military soil degradation is random in nature and depends on the intensity of fighting and the types of munitions used. Whereas the soil at the Yavoriv Military Training Ground is most heavily contaminated with chromium, lead and zinc are the predominant contaminants in the eastern regions of Ukraine, which calls for a tailored approach to the selection of bioremediation methods.

3.2. The impact of hostilities on the diversity of microorganisms in soil samples

Changes in the microbial composition of soils caused by the detonation of munitions and military activities result from a complex combination of chemical toxic stress and physical habitat degradation⁶⁷. The main chemical stressors for the microbiota are energetic compounds (TNT, RDX, HMX) in extremely high concentrations, as well as heavy metals, which in some cases reach tens of thousands of mg/kg, causing a significant reduction in microbial biodiversity and functional stability^{68,69,70}.

Studies show that high levels of potentially toxic elements, in particular Pb, Cu, Sb and Hg, have an inhibitory effect on microbial biomass. Soil enzymatic activity is a particularly sensitive indicator. For example, dehydrogenase activity is used as an indicator of overall soil biological activity; its suppression correlates with increasing levels of contamination^{71,72}.

⁶² 'Vplyv aviabomb ta zgoriloi tekhniki na zabrudnennia gruntiv: doslidzhennia' (SuperAgronom.com, 2024) <https://superagronom.com/blog/987-zabrudnennya-gruntiv-vajkimi-metalami-v-mistsyahpadinnya-aviabomb-ta-zgoriloyi-tehniki-doslidjennya-v-sumskiy-oblasti> accessed 20 May 2026.

⁶³ A Yakymchuk, O Balanda and M Bzowska-Bakalarz, 'Assessment of Soil Contamination of Ukraine with Heavy Metals During the War' (2024) 196 *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization & Management*.

⁶⁴ K Petrushka, MS Malovanyy, D Skrzypczak, K Chojnacka and J Warchol, 'Risks of Soil Pollution with Toxic Elements During Military Actions in Lviv' (2024) 25(1) *Journal of Ecological Engineering* 195 <https://doi.org/10.12911/22998993/175136>.

⁶⁵ 'Heokhimičnyj stan gruntiv u zoni bojovyh dij: imovirni ryzyky dlia ahrosektoru ta shliachy vyrishennia' (AgroPortal, 2024) <https://agroportal.ua/blogs/geohimichnyi-stan-gruntiv-u-zoni-boyovih-diy-imovirni-riziki-dlya-agrosektoru-ta-shlyahi-virishennya> accessed 21 May 2026.

⁶⁶ A Splodytel, O Holubtsov, S Chumachenko and L Sorokina, 'The impact of Russia's war against Ukraine on the state of the country's soil. Analysis results' (Report, Ecoalaction - Centre for Environmental Initiatives 2023).

⁶⁷ H Zhang, Y Zhu, S Wang, S Zhao, Y Nie, X Liao, H Cao, H Yin and X Liu, 'Contamination characteristics of energetic compounds in soils of two different types of military demolition range in China' (2022) 295 *Environmental Pollution* 118654 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121022363>.

⁶⁸ A Rodríguez-Seijo, D Fernández-Calviño, M Arias-Estévez and D Arenas-Lago, 'Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review' (2024) 60 *Biology and Fertility of Soils* 813 <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>.

⁶⁹ J Luo, Y Li, H Cao, Y Zhu, X Liu, H Li and Liao X, 'Variations of microbiota in three types of typical military contaminated sites: Diversities, structures, influence factors, and co-occurrence patterns' (2023) 443(B) *Journal of Hazardous Materials* 130290 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389422020842>.

⁷⁰ H Zhang, Y Zhu, S Wang, S Zhao, Y Nie, X Liao, H Cao, H Yin and X Liu, 'Contamination characteristics of energetic compounds in soils of two different types of military demolition range in China' (2022) 295 *Environmental Pollution* 118654 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121022363>.

⁷¹ K Gębka, J Beldowski and M Beldowska, 'The impact of military activities on the concentration of mercury in soils of military training grounds and marine sediments' (2016) *Environmental Science and Pollution Research* <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7436-0>.

⁷² IJC Rijk and A Ekblad, 'Carbon and nitrogen cycling in a lead polluted grassland evaluated using stable isotopes (δ13C and δ15N) and microbial, plant and soil parameters' (2020) 449 *Plant and Soil* 249 <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04467-7>.

In addition to direct chemical effects, the microbiota is also affected by mechanical stress. Explosions of munitions trigger a process known as “bombturbation”. The use of heavy tracked vehicles in combat zones causes soil compaction, which has a negative impact on microbial growth^{73, 74}. However, it is interesting to note that, over time, compaction can alter the structure of the micropores, leading to a predominance of Gram-positive bacteria over Gram-negative bacteria due to changes in the availability of moisture and oxygen⁷⁵.

Changes in microbial composition also depend on soil pH and organic matter content. In alkaline soils, metals often convert into insoluble forms (oxides, carbonates), which may somewhat mitigate their toxic effects on microorganisms, whereas in acidic soils their mobility and toxicity increase^{76, 77}.

Military contamination causes the vertical migration of toxicants. The structure of bacterial communities at different depths is controlled by a combination of energy compound levels and soil moisture⁷⁸.

Despite the overall negative impact, prolonged contamination promotes the selection of tolerant strains. Bacteria of the genera *Pseudomonas*, *Bacillus* and *Klebsiella* have been identified in landfill soils; these have adapted to high concentrations of toxicants and are capable of degrading TNT and RDX^{79,80,81}. These microorganisms have the potential to be used in bioremediation schemes at military sites⁸².

Changes in microbial diversity have a chain effect on higher trophic levels. For example, a reduction in microbial activity can reduce the availability of nutrients to plants and suppress populations of soil fauna, such as nematodes and earthworms⁸³.

Modern ammunition introduces a new factor of impact: microplastics resulting from the fragmentation of plastic components in projectiles⁸⁴. These polymer particles can alter the structure

⁷³ A Rodríguez-Seijo, D Fernández-Calviño, M Arias-Estévez and D Arenas-Lago, ‘Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review’ (2024) 60 *Biology and Fertility of Soils* 813 <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>

⁷⁴ J Luo, Y Li, H Cao, Y Zhu, X Liu, H Li and Liao X, ‘Variations of microbiota in three types of typical military contaminated sites: Diversities, structures, influence factors, and co-occurrence patterns’ (2023) 443(B) *Journal of Hazardous Materials* 130290 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389422020842>.

⁷⁵ A Rodríguez-Seijo, D Fernández-Calviño, M Arias-Estévez and D Arenas-Lago, ‘Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review’ (2024) 60 *Biology and Fertility of Soils* 813 <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>.

⁷⁶ J Luo, Y Li, H Cao, Y Zhu, X Liu, H Li and Liao X, ‘Variations of microbiota in three types of typical military contaminated sites: Diversities, structures, influence factors, and co-occurrence patterns’ (2023) 443(B) *Journal of Hazardous Materials* 130290 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389422020842>.

⁷⁷ SL Larson, CL Teeter, VF Medina and WA Martin, *Treatment and management of closed or inactive small arms firing ranges* (U.S. Army Corps of Engineers 2019).

⁷⁸ J Luo, Y Li, H Cao, Y Zhu, X Liu, H Li and Liao X, ‘Variations of microbiota in three types of typical military contaminated sites: Diversities, structures, influence factors, and co-occurrence patterns’ (2023) 443(B) *Journal of Hazardous Materials* 130290 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389422020842>.

⁷⁹ MÁ Cabrera, SL Márquez, CP Quezada, MI Osorio, E Castro-Nallar, FD González-Nilo and JM Pérez-Donoso, ‘Biotransformation of 2,4,6-trinitrotoluene by *Pseudomonas* sp. TNT3 isolated from Deception Island, Antarctica’ (2020) 262 *Environmental Pollution* 113922 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113922>.

⁸⁰ J Li, X Yang, J-L Lai, Y Zhang, X-G Luo, S-P Zhao and Y-B Zhu, ‘Characteristics of RDX degradation and the mechanism of the RDX exposure response in a *Klebsiella* sp. strain’ (2021) 176 *Biochemical Engineering Journal* 108174 <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108174>.

⁸¹ J Luo, Y Li, H Cao, Y Zhu, X Liu, H Li and Liao X, ‘Variations of microbiota in three types of typical military contaminated sites: Diversities, structures, influence factors, and co-occurrence patterns’ (2023) 443(B) *Journal of Hazardous Materials* 130290 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389422020842>.

⁸² JA Siles and R Margesin, ‘Insights into microbial communities mediating the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil from an Alpine former military site’ (2018) 102 *Applied Microbiology and Biotechnology* 4409 <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8932-6>.

⁸³ M Lu, Li H, Li Y, Lu Y, Wang H and Wang X, ‘Exploring the toxicology of depleted uranium with *Caenorhabditis elegans*’ (2020) 5 *ACS Omega* 12119 <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00380>.

⁸⁴ G Rotter, C Correzzola, VF Del Ángel, E Daminato and V Causin, ‘Characterisation of plastic wads: A useful approach for elucidating shooting accidents and homicides involving shotguns’ (2022) 332 *Forensic Science International* 111194 <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2022.111194>.

of microbial biofilms in the soil and interact with chemical pollutants, creating additional environmental pressure^{85,86,87}.

To assess microbial community species richness and evenness, alpha-diversity indices were calculated for soil samples from the crater and an undamaged nearby area (Table 5). High alpha-diversity indices were recorded in the soil from both plots, indicating a high level of complexity and stability in the soil bacterial community. At the same time, a general trend of a slight decrease in all alpha-diversity metrics was observed in soil samples from the crater compared with those from the undamaged nearby area. The high values of the Shannon index (>8.9) and Simpson's index (>0.99) in both samples indicate a well-established, stable, and ecologically flexible soil bacterial community. A slight decrease in alpha-diversity indices (Observed OTUs, Chao1, and Shannon) in the soil from the pit suggests that the tested factor exerted moderate selective pressure on the microbiota. This pressure likely suppressed sensitive or rare groups of microorganisms, whilst the core taxonomic group retained its functional stability.

Table 5

Alpha diversity indices		
Alpha Diversity	Soil from the undamaged area	Soil from the crater
Observed species, OTUs	3119	2944
Shannon's diversity index	9.177	8.981
Simpson's index of diversity	0.995	0.992
Chao1 index	3255.005	3010.333

To gain a deeper understanding of the differences between the microbial communities in the soil from the crater and the undamaged area nearby, a comparative analysis of OTUs composition was carried out, with the results visualized using a Venn diagram (Fig. 1).

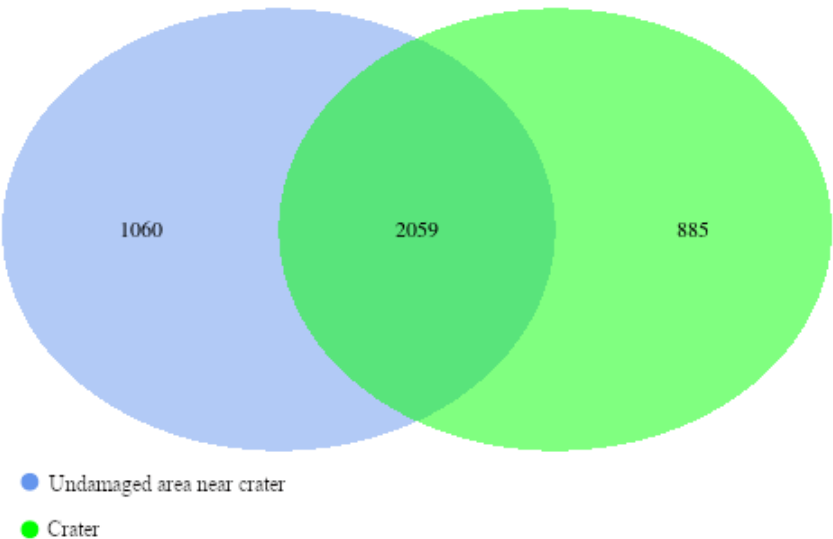


Figure 1. Similarity (or dissimilarity) and overlaps are shown in a Venn diagram, which shows the OTUs distribution in the soil samples

⁸⁵ L Zimmermann, A Dombrowski, C Völker and M Wagner, 'Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics? In vitro toxicity and chemical composition' (2020) 145 *Environment International* 106066 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106066>.
⁸⁶ E Liwarska-Bizukojc, 'Effect of (bio)plastics on soil environment: A review' (2021) 795 *Science of the Total Environment* 148889 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148889>.
⁸⁷ NN Nik Mut, J Na and J Jung, 'A review on fate and ecotoxicity of biodegradable microplastics in aquatic system: Are biodegradable plastics truly safe for the environment?' (2024) 344 *Environmental Pollution* 123399 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123399>.

The high proportion of common OTUs (2059), accounting for approximately 66% of the total taxa in the soil metagenome from the undisturbed site and 70% from the artillery firing range, indicates significant functional stability of the soil microbiome. This core group likely drives the major biogeochemical cycles and ensures the stability of the soil ecosystem. The presence of a significant number of unique OTUs in each sample confirms the ecological plasticity of the microbiota and its sensitivity to changes in environmental conditions. The reduction in the number of unique OTUs in the soil microbiome from the craters to 885 suggests that the explosions of munitions led to the elimination of some rare or sensitive species, while simultaneously promoting the survival or, possibly, the emergence of specific taxa adapted to the new conditions. These unique taxa are potential indicators of specific soil ecological niches.

In this study, we identified 38 phyla, 96 classes, 199 orders, 248 families, and 377 genera of prokaryotic microorganisms. Among the OTUs of prokaryotic microorganisms detected in the metagenome of both soil samples, 96.4–99.7% belonged to bacteria (35 phyla), and 0.3–3.5% to archaea (Table 6).

Table 6

Relative abundance of prokaryotic OTUs at the phylum level in soil samples from the crater and from a visually undamaged area within the military training range

Kingdom	Phylum	Phylum, relative abundance	
		Near crater	Crater
Archaea	<i>Crenarchaeota</i>	3.49	0.27
	<i>Thermoplasmatota</i>	0.05	0.002
	<i>Nanoarchaeota</i>	0.004	0.005
Bacteria	<i>Proteobacteria</i>	24.29	36.72
	<i>Actinobacteriota</i>	35.75	28.87
	<i>Acidobacteriota</i>	11.90	15.34
	<i>Chloroflexi</i>	7.47	4.85
	<i>Gemmatimonadota</i>	4.28	2.46
	<i>Methyloirabilota</i>	2.90	1.06
	<i>Bacteroidota</i>	0.96	2.31
	<i>Verrucomicrobiota</i>	1.36	1.97
	<i>Myxococcota</i>	1.42	1.70
	<i>Firmicutes</i>	1.37	1.34
	<i>Nitrospirota</i>	0.77	0.20
	<i>Latescibacterota</i>	0.66	0.24
	<i>RCP2-54</i>	0.59	0.58
	<i>Desulfobacterota</i>	0.40	0.29
	<i>Armatimonadota</i>	0.11	0.29
	<i>Bdellovibrionota</i>	0.19	0.21
	<i>Entothionellaeota</i>	0.17	0.07
	<i>Patescibacteria</i>	0.11	0.17
	<i>MBNT15</i>	0.15	0.07
	<i>Planctomycetota</i>	0.10	0.13
	<i>NB1-j</i>	0.13	0.02
	<i>Elusimicrobiota</i>	0.05	0.10
	<i>WPS-2</i>	0.007	0.07
	<i>Cyanobacteria</i>	0.05	0.06
	<i>Dependentiae</i>	0.05	0.03
	<i>Fibrobacterota</i>	0.02	0.05
	<i>GAL15</i>	0.05	0.03

Continued from Table 6

Kingdom	Phylum	Phylum, relative abundance	
		Near crater	Crater
Bacteria	<i>Dadabacteria</i>	0.003	0.04
	<i>Sumerlaeota</i>	0.02	0.02
	<i>SAR324_clade(Marine_group_B)</i>	0.02	0.009
	<i>FCPU426</i>	0.006	0.01
	<i>Zixibacteria</i>	0.008	0
	<i>WS2</i>	0.006	0.003
	<i>Margulisbacteria</i>	0.003	0
	<i>Deinococcota</i>	0	0.0006
Others		1.04	0.38

Explosions altered soil composition, thereby altering the abundance of archaea. The OTUs belonging to *Archaea* were identified as *Crenarchaeota*, *Thermoplasmatota*, and *Nanoarchaeota*. In the crater soil, the relative abundance of *Archaea* OTUs was lower than in the nearby area soil, which was not visibly affected. In soil samples from the crater and the nearby area, OTUs of *Crenarchaeota* were predominant; however, the relative abundance of *Crenarchaeota* OTUs in the soil from the crater was 13 times lower than in the soil from the nearby area. The relative abundance of *Thermoplasmatota* OTUs in the soil sample from the crater was also lower compared to that in the undisturbed soil. No significant changes in the abundance of *Nanoarchaeota* OTUs were observed between the soil from the crater and that from the unaffected area (Table 7).

Among the *Crenarchaeota*, the most abundant OTUs belong to the order *Nitrososphaerales*, particularly the family *Nitrososphaeraceae*. At the genus level, *Candidatus Nitrocosmicus* accounted for the largest number of identified OTUs in both the soil from the crater and the nearby area. The relative abundance of OTUs of *Candidatus Nitrocosmicus* in the soil from the crater was 3.5 times lower than in the soil from the nearby undamaged area. OTUs of *Candidatus Nitrososphaera* and *Candidatus Nitrosotenuis* were detected in soil samples taken near the crater, but were not detected in soil samples taken from the crater. In contrast, OTUs of *Candidatus Nitrosotalea* were detected in soil samples from the crater but not in those from the nearby area (Table 7).

Table 7

Relative abundance of *Crenarchaeota* OTUs in soil samples from the crater and from a visually undamaged area within the military training ground

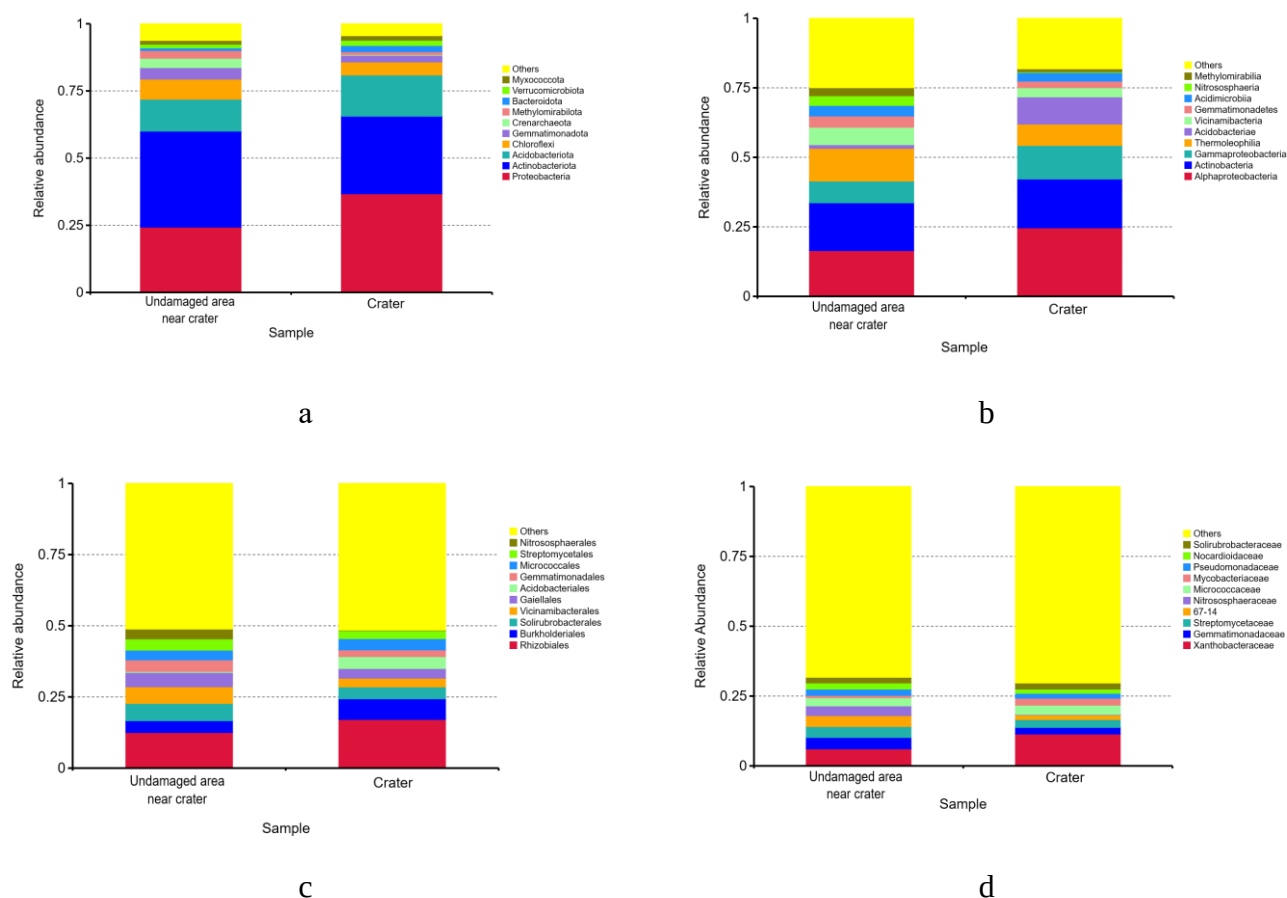
Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
				Near crater	Crater
<i>Nitrososphaeria</i>	<i>Nitrososphaerales</i>	<i>Nitrososphaeraceae</i>	<i>Candidatus_Nitrocosmicus</i>	0.39	0.11
			<i>Candidatus_Nitrososphaera</i>	0.15	0
	<i>Nitrosopumilales</i>	<i>Nitrosopumilaceae</i>	<i>Candidatus_Nitrosotenuis</i>	0.009	0
	<i>Nitrosotaleales</i>	<i>Nitrosotaleaceae</i>	<i>Candidatus_Nitrosotalea</i>	0	0.003

The top 10 phyla of *Bacteria* included *Proteobacteria*, *Actinobacteriota*, *Acidobacteriota*, *Chloroflexi*, *Gemmatimonadota*, *Methyloirabilota*, *Bacteroidota*, *Verrucomicrobiota*, *Myxococcota*,

Firmicutes. The *Proteobacteria*, *Actinobacteriota*, and *Acidobacteriota* accounted for the largest proportion of identified bacterial OTUs. OTUs from other phyla were fewer in number (Fig. 2).

The relative abundance of OTUs of *Proteobacteria*, *Actinobacteriota*, and *Acidobacteriota* in soil samples from the crater and from the undamaged area differed: the relative abundance of OTUs of *Proteobacteria* and *Acidobacteriota* in soil from the crater was higher than in soil from the nearby area, while that of *Actinobacteriota* was lower (see Table 4).

OTUs belonging to the *Actinobacteriota* accounted for approximately 35% of all transcriptional units in the soil metagenome from the visually undamaged area. In soil from the crater, their relative abundance decreased to nearly 29%. This is the most abundant group of bacteria in the undamaged soil. Among the OTUs of *Actinobacteriota*, 5 classes were identified (the most numerous and diverse being the class *Actinobacteria*), comprising 21 orders: *Solirubrobacterales*, *Gaiellales*, *Micrococcales*, *Streptomycetales*, *Propionibacteriales*, *Frankiales*, *Corynebacteriales*, *Pseudonocardiales*, IMCC26256, *Micromonosporales*, *Microtrichales*, *Streptosporangiales*, *Actinomarinales*, *Kineosporiales*, FFCH16263, *Rubrobacterales*, *Catenulisporales*, 0319-7L14, *Acidimicrobiales*, *Euzebyales*, KIST-JJY010 (Table 8 lists 14 orders). The most numerous order was *Solirubrobacterales*. The relative abundance of OTUs of *Solirubrobacterales* in soil from the crater was lower than in soil from the undisturbed area (6.06% and 4.17%, respectively). Slightly smaller in relative abundance was order *Gaiellales*. The relative abundance of OTUs of *Gaiellales* was also lower in the soil from the crater. *Euzebyales* and KIST-JJY010 were the least abundant (relative abundance less than 0.002%) in the soil from the undamaged area, and were not detected in the soil from the crater.



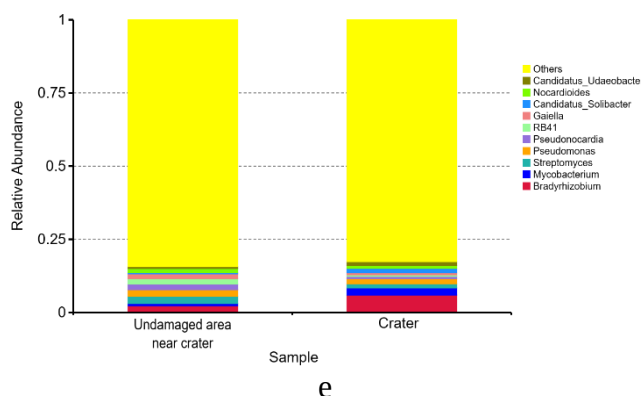


Figure 2. The relative abundances of the top 10 prokaryotic taxa at the phylum (a), class (b), order (c), family (d), and genus (e) levels in the metagenomes of the studied soils

During the metagenomic analysis of the studied soils at the family level, it was found that in the soil from the undamaged area, the most abundant families were *Streptomycetaceae* (relative abundance 3.94%), 67-14 – unclassified OTUs belonging to *Solirubrobacterales* (relative abundance 3.90%), *Micrococcaceae* (relative abundance 2.94%), *Nocardioideae* (relative abundance 2.20%), *Solirubrobacteraceae* (relative abundance 2.02%), and *Pseudonocardia* (relative abundance 2.04%). In soil from the crater, the relative abundance of *Streptomycetaceae*, 67-14 and *Nocardioideae* decreased, while that of *Micrococcaceae* and *Solirubrobacteraceae* increased slightly; therefore, the most abundant families were *Micrococcaceae* (relative abundance 3.32%), *Streptomycetaceae* (relative abundance 2.82%), *Mycobacteriaceae* (relative abundance 2.49%), and *Solirubrobacteraceae* (relative abundance 2.18%).

Table 8

Relative abundance of *Actinobacteriota* OTUs in soil samples from the crater and from a visually undamaged area within the military training ground

Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
				Near crater	Crater
Actinobacteria	Corynebacterales	<i>Mycobacteriaceae</i>	<i>Mycobacterium</i>	0.81	2.49
		<i>Nocardiaceae</i>	<i>Rhodococcus</i>	0.02	0.07
			<i>Smaragdicoscus</i>	0.005	0.02
	Streptomycetales	<i>Streptomycetaceae</i>	<i>Streptomyces</i>	2.41	1.37
	Pseudonocardiales	<i>Pseudonocardia</i>	<i>Pseudonocardia</i>	1.90	0.77
			<i>Crossiella</i>	0.003	0.11
			<i>Actinomycetospira</i>	0.08	0.04
			<i>Amycolatopsis</i>	0.02	0.06
			<i>Actinophytocola</i>	0.009	0.02
			<i>Kibdelosporangium</i>	0	0.001
	Propionibacterales	<i>Nocardioideae</i>	<i>Nocardioideae</i>	1.37	0.91
			<i>Marmoricola</i>	0.43	0.36
			<i>Kribbella</i>	0.14	0.15
			<i>Aeromicrobium</i>	0.07	0.04
			<i>Actinopolymorpha</i>	0.02	0.001
		<i>Nocardiaceae</i>	<i>Nocardia</i>	0.006	0.06
		<i>Propionibacteriaceae</i>	<i>Micrococcus</i>	0.86	0.16
			<i>Luteococcus</i>	0	0.002

Continued from Table 8

Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
				Near crater	Crater
Actinobacteria	Frankiales	Acidothermaceae	Acidothermus	0.06	1.36
		Frankiaceae	Jatrophihabitans	0.21	0.58
		Geodermatophilaceae	Blastococcus	0.06	0.27
		Geodermatophilaceae	Modestobacter	0.03	0.12
			Geodermatophilus	0.02	0.03
		Sporichthyaceae	Antricoccus	0	0.004
			Candidatus_Planktophila	0	0.07
		Micromonosporales	Sporichthya	0.007	0.02
	Micromonosporales	Micromonosporaceae	Luedemannella	0.40	0.79
			Catellatospora	0.28	0.21
			Dactylosporangium	0.16	0.11
			Virgisporangium	0.11	0.05
			Rhizocola	0	0.03
			Actinoplanes	0.03	0.02
			Allocatelliglobospora	0.02	0.02
	Streptosporangiales	Streptosporangiaceae	Streptosporangium	0.21	0.09
			Sphaerisporangium	0.16	0.04
			Nonomuraea	0.09	0.05
			Acrocarpospora	0.05	0.02
		Thermomonosporaceae	Actinoallomurus	0.20	0.17
			Actinocorallia	0.13	0.02
			Actinomadura	0.04	0.05
		unidentified	Motilibacter	0	0.0006
	Micrococcales	Microbacteriaceae	Galbitalea	0.05	0.14
			Agromyces	0.09	0.03
			Microbacterium	0.02	0.05
			Leucobacter	0	0.01
			Leifsonia	0.001	0.003
		Intrasporangiaceae	Terrabacter	0.09	0.06
		Cellulomonadaceae	Cellulomonas	0.01	0.07
		Micrococcaceae	Arthrobacter	0	0.01
			Kocuria	0.01	0.002
		Dermacoccaceae	Flexivirga	0.0006	0
	Catenulisporales	Catenulisporaceae	Catenulispora	0.08	0.06
	Kineosporiales	Actinospicaceae	Actinospica	0.007	0.01
		Kineosporiaceae	Angustibacter	0.02	0.03
Thermoleophilina	Gaiellales	Gaiellaceae	Gaiella	1.68	0.74
	Solirubrobacterales	Solirubrobacteraceae	Solirubrobacter	1.04	0.53
			Conexibacter	0.81	0.94
			Ilumatobacter	0.003	0.002
		Iamiaceae	Iamia	0.16	0.16
	IMCC26256	unidentified_IMCC26256	unidentified_IMCC26256	0	0.03
	Actinomarinales	unidentified	unidentified	0.003	0
Rubrobacteria	Rubrobacterales	Rubrobacteriaceae	Rubrobacter	0.14	0.008

Table 9

Relative abundance of *Alphaproteobacteria* OTUs in soil samples from the crater and from a visually undamaged area within the military training ground

Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
			Near crater	Crater
<i>Rhizobiales</i>	<i>Xanthobacteraceae</i>	<i>Bradyrhizobium</i>	2.27	5.91
		<i>Rhodoplanes</i>	0.95	0.72
		<i>unidentified</i>	0.006	0.06
		<i>Afipia</i>	0.01	0.05
		<i>Pseudolabrys</i>	0.01	0.03
		<i>Starkeya</i>	0.02	0.007
	<i>Hyphomicrobiaceae</i>	<i>Pedomicrobium</i>	1.25	0.51
		<i>Hyphomicrobium</i>	0.23	0.02
	<i>Beijerinckiaceae</i>	<i>Methylocapsa</i>	0.13	0.92
		<i>Microvirga</i>	0.46	0.39
		<i>Roseiarcus</i>	0.002	0.23
		<i>Bosea</i>	0.009	0.05
		<i>Methylobacterium-Methylobacterium</i>	0.02	0.04
		<i>FFCH5858</i>	0.04	0.02
		<i>Psychroglaciecola</i>	0.005	0.008
		<i>1174-901-12</i>	0.001	0.0006
	<i>Rhizobiaceae</i>	<i>Mesorhizobium</i>	0.23	0.64
		<i>Allorhizobium-Neorhizobium-Pararhizobium-Rhizobium</i>	0.34	0.41
		<i>Phyllobacterium</i>	0.34	0.25
		<i>Ensifer</i>	0.003	0.003
	<i>unidentified</i>	<i>Nordella</i>	0.57	0.21
		<i>Bauldia</i>	0.16	0.12
		<i>Phreatobacter</i>	0.006	0.001
	<i>Labraceae</i>	<i>Labrys</i>	0.10	0.38
	<i>Devosiaceae</i>	<i>Devosia</i>	0.10	0.21
	<i>Rhodomicrobiaceae</i>	<i>Rhodomicrobium</i>	0.04	0.08
	<i>Kaistiaceae</i>	<i>Kaistia</i>	0	0.008
	<i>Pleomorphomonadaceae</i>	<i>Chthonobacter</i>	0.001	0.002
<i>Reyranelles</i>	<i>Reyranelleaceae</i>	<i>Reyranelle</i>	0.38	1.20
<i>Sphingomonadales</i>	<i>Sphingomonadaceae</i>	<i>Sphingomonas</i>	0.86	0.72
		<i>Novosphingobium</i>	0.05	0.13
		<i>Plot4-2H12</i>	0.07	0.06
		<i>Altererythrobacter</i>	0.02	0.004
		<i>Sphingobium</i>	0	0.003
<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	0.18	0.74
<i>Tistrellales</i>	<i>Geminicoccaceae</i>	<i>Candidatus_Alysiosphaera</i>	0.22	0.14
		<i>Geminicoccus</i>	0.003	0.004
<i>Caulobacterales</i>	<i>Caulobacteraceae</i>	<i>Phenyllobacterium</i>	0.09	0.22
		<i>Caulobacter</i>	0.02	0.05
		<i>Asticcacaulis</i>	0.004	0.02
		<i>Brevundimonas</i>	0.002	0.004
	<i>Hyphomonadaceae</i>	<i>SWB02</i>	0.07	0.09
		<i>Hirschia</i>	0.04	0.05

Continued from Table 9

Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
			Near crater	Crater
<i>Acetobacterales</i>	<i>Acetobacteraceae</i>	<i>Rhodovastum</i>	0.01	0.19
		<i>Craurococcus-Caldovatus</i>	0.04	0.005
		<i>Acidicaldus</i>	0	0.02
		<i>Roseomonas</i>	0	0.004
		<i>Acidiphilium</i>	0.002	0.003
<i>Dongiales</i>	<i>Dongiaceae</i>	<i>Dongia</i>	0.11	0.10
<i>Azospirillales</i>	<i>Azospirillaceae</i>	<i>Skermanella</i>	0.08	0.09
	<i>Inquilinaceae</i>	<i>Inquilinus</i>	0.06	0.04
<i>Rhodobacterales</i>	<i>Rhodobacteraceae</i>	<i>Amaricoccus</i>	0.04	0.02
		<i>Rubellimicrobium</i>	0.003	0.007
		<i>Cereibacter</i>	0.002	0.007
		<i>Rhodobacter</i>	0.006	0.001
<i>Paracaedibacterales</i>	<i>Paracaedibacteraceae</i>	<i>Candidatus_Paracaedibacter</i>	0.003	0.01
		<i>Candidatus_Captivus</i>	0.0006	0.001
<i>Rickettsiales</i>	<i>Rickettsiaceae</i>	<i>Candidatus_Megaira</i>	0.01	0.0006
	<i>Mitochondria</i>	<i>unidentified</i>	0.0006	0.001

Table 10

Relative abundance of *Gammaproteobacteria* OTUs in soil samples from the crater and from a visually undamaged area within the military training ground

Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
			Near crater	Crater
<i>Pseudomonadales</i>	<i>Pseudomonadaceae</i>	<i>Pseudomonas</i>	2.26	1.75
	<i>Cellvibrionaceae</i>	<i>Cellvibrio</i>	0	0.03
	<i>Moraxellaceae</i>	<i>Acinetobacter</i>	0.006	0
		<i>Alkanindiges</i>	0	0.002
	<i>Pseudohongiellaceae</i>	<i>Blyi10</i>	0	0.006
	<i>Halomonadaceae</i>	<i>Halomonas</i>	0	0.0006
<i>Burkholderiales</i>	<i>Oxalobacteraceae</i>	<i>Massilia</i>	0.58	1.09
		<i>Pseudoduganella</i>	0.17	0.18
		<i>Duganella</i>	0.10	0.09
		<i>Noviherbaspirillum</i>	0.02	0.09
		<i>Undibacterium</i>	0.004	0.02
	<i>Burkholderiaceae</i>	<i>BCP-group</i>	0.08	0.94
		<i>Cupriavidus</i>	0.005	0.19
		<i>Limnobacter</i>	0.003	0.01
		<i>Lautropia</i>	0.007	0.01
	<i>Nitrosomonadaceae</i>	<i>MND1</i>	0.40	0.19
		<i>Ellin6067</i>	0.11	0.38
		<i>IS-44</i>	0.08	0.09
		<i>Nitrospira</i>	0.005	0.02
		<i>Nitrosomonas</i>	0	0.006
	<i>Comamonadaceae</i>	<i>Piscinibacter</i>	0.20	0.28
		<i>Rhizobacter</i>	0.11	0.27
		<i>Rhodoferax</i>	0.10	0.20
		<i>Polaromonas</i>	0.04	0.08
		<i>Variovorax</i>	0.002	0.08

Continued from Table 10

Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
			Near crater	Crater
<i>Burkholderiales</i>	<i>Comamonadaceae</i>	<i>Ramlibacter</i>	0.04	0.05
		<i>Paucibacter</i>	0.02	0.04
		<i>Pelomonas</i>	0.005	0.03
		<i>Azohydromonas</i>	0.01	0.02
		<i>Ideonella</i>	0.01	0.02
		<i>Caenimonas</i>	0.01	0.01
		<i>Comamonas</i>	0	0.006
	<i>Chromobacteriaceae</i>	<i>Vogesella</i>	0.04	0
	<i>Rhodocyclaceae</i>	<i>Dechloromonas</i>	0.01	0.001
		<i>Uliginosibacterium</i>	0.005	0.008
		<i>Ferribacterium</i>	0.001	0.006
		<i>Georgfuchsia</i>	0.0006	0.006
		<i>Sulfuritalea</i>	0.003	0.0006
	<i>Chitinimonadaceae</i>	<i>Chitinimonas</i>	0.01	0.01
	<i>Methylophilaceae</i>	<i>Methylotenera</i>	0.002	0.01
	<i>Alcaligenaceae</i>	<i>Parvibium</i>	0.007	0
	<i>Sutterellaceae</i>	<i>AAP99</i>	0.0006	0.005
	<i>Gallionellaceae</i>	<i>Gallionella</i>	0	0.004
<i>Steroidobacterales</i>	<i>Steroidobacteraceae</i>	<i>Steroidobacter</i>	0.25	0.16
	<i>Woeseiaceae</i>	<i>JTB255_marine_benthic_group</i>	0.02	0
<i>Nitrosococcales</i>	<i>Nitrosococcaceae</i>	<i>wb1-P19</i>	0.20	0.003
<i>Xanthomonadales</i>	<i>Xanthomonadaceae</i>	<i>Arenimonas</i>	0.06	0.17
		<i>Lysobacter</i>	0.06	0.07
		<i>Pseudoxanthomonas</i>	0.006	0.01
		<i>Stenotrophomonas</i>	0	0.004
	<i>Rhodanobacteraceae</i>	<i>Dyella</i>	0.005	0.10
		<i>Dokdonella</i>	0.03	0.07
		<i>Ahniella</i>	0.003	0.02
		<i>Rudaea</i>	0	0.01
		<i>Luteibacter</i>	0.003	0.01
<i>Salinisphaerales</i>	<i>Solimonadaceae</i>	<i>Polycyclovorans</i>	0.02	0.05
		<i>Nevskia</i>	0.001	0.02
		<i>Panacagrimonas</i>	0.006	0.01
<i>Legionellales</i>	<i>Legionellaceae</i>	<i>Legionella</i>	0.03	0.03
<i>Diplorickettsiales</i>	<i>Diplorickettsiaceae</i>	<i>Aquicella</i>	0.02	0.03
<i>Coxiellales</i>	<i>Coxiellaceae</i>	<i>Coxiella</i>	0.02	0.02
<i>Acidiferrobacterales</i>	<i>Acidiferrobacteraceae</i>	<i>Sulfurifustis</i>	0.02	0.01

A total of 67 genera were identified within the *Actinobacteriota* OTUs. In both the soil from the undamaged area and the soil from the crater, the most abundant genus was *Mycobacterium*. The relative abundance of *Mycobacterium* OTUs in the soil from the crater was three times higher than in the soil from the undamaged area. Other OTUs were also identified in the soil from the crater that were not found in the soil from the undamaged area, including: *Candidatus Planktophila*, *Rhizocola*, *Leucobacter*, *Arthrobacter*, *Antricoccus*, *Luteococcus*, *Kibdelosporangium*, *Motilibacter*. Along with an increase in the relative abundance of OTUs from certain genera in the soil from the crater, we found genera whose relative

abundance of OTUs was lower compared to the soil from the undamaged area. These families included *Streptomyces*, *Pseudonocardia*, *Microlunatus*, *Blastococcus*, *Modestobacter*, *Sphaerisporangium* etc.

OTUs of *Proteobacteria* were identified as *Alphaproteobacteria* i *Gammaproteobacteria*. OTUs of *Alphaproteobacteria* were distributed among 19 orders and 41 families. The largest amount of OTUs of *Alphaproteobacteria* was identified as *Rhizobiales* (12.52% of identified OTUs in soil from the undamaged area and 17.11% in soil from the crater). At the family level, OTUs of *Xanthobacteraceae* were dominant. The relative abundance of OTUs of *Xanthobacteraceae* was nearly twice as high in the soil sample from the crater. In both soil samples, the most abundant genus was *Bradyrhizobium*. The relative abundance of *Bradyrhizobium* OTUs was 2.6 times higher in the soil from the crater. Among the smallest families were *Rickettsiaceae*, *Kaistiaceae*, *Micavibrionaceae*, *Sneathiellaceae*, *Magnetospirillaceae*, *Pleomorphomonadaceae*. The relative abundance of OTUs belonging to these families did not exceed 0.008%. A total of 60 genera were identified (Table 9).

The OTUs of *Gammaproteobacteria* belonged to 22 orders. Most of the identified OTUs belonged to the *Burkholderiales*. The relative abundance of OTUs belonging to this order was 4.12% in soil from the undisturbed area and 7.25% in soil from the crater. This order was also the most diverse among the *Gammaproteobacteria*, as in both soil samples, *Burkholderiales* OTUs were distributed across 32 families (Table 10 lists only the 11 most abundant) and 40 genera. The majority of OTUs were identified as *Oxalobacteraceae*, with *Massilia* as the dominant genus. The abundance of OTUs at the genus level differed predominantly between soil samples from the crater and the nearby area; however, the most striking changes in the relative abundance of OTUs were observed in the genera *Cellvibrio*, *Alkanindiges*, *Blyi10*, *Halomonas*, *Nitrosomonas*, *Comamonas*, *Gallionella*, *Stenotrophomonas*, and *Rudaea*, which were not detected in soil samples from the undamaged area but were identified in soil from the crater. Conversely, no OTUs of *Acinetobacter*, *Vogesella*, *Parvibium*, or *JTB255_marine_benthic_group* were detected in the soil from the crater.

The OTUs of *Acidobacteriota* were distributed across 12 classes. Five of them are classified as *Acidobacteriae*, *Vicinamibacteria*, *Blastocatellia*, *Holophagae* and *Thermoanaerobaculia*, and the remaining classes are designated as Subgroup 22, Subgroup 5, Subgroup 25, Subgroup 11, Subgroup 18, AT-s3-28, Subgroup 19, and Subgroup 20. The majority of *Acidobacteriota* OTUs belonged to the *Vicinamibacteria*. In soil from the undamaged area, the OTU count for *Vicinamibacteria* was 5.88%, while in soil from the crater, it was 3.07%. The relative abundance of OTUs belonging to *Blastocatellia*, Subgroup 22, Subgroup 5, Subgroup 25, Subgroup 11, Subgroup 18, and AT-s3-2 in the soil from the crater was also 2–10 times lower. No traces of OTUs of Subgroup_19 i Subgroup_20 were found in the soil of the crater. The relative abundance of *Acidobacteria* OTUs in the soil from the crater increased significantly—from 1.30% in the soil from the undamaged area to 9.76% in the soil from the crater. Although at a slower rate, the relative abundance of *Holophagae* is increasing in the damaged soil (Table 11).

The identified OTUs of *Acidobacteriota* belonged to 21 orders, among which *Vicinamibacterales*, *Acidobacteriales*, *Pyrinomonadales*, *Bryobacteriales*, *Solibacteriales*, *Thermoanaerobaculales*, *Blastocatellales*, *Holophagales* were classified. The unclassified OTUs belonged to *Blastocatellia* (11–24, DS-100), *Acidobacteriae* (Subgroup 2, Subgroup_12, Subgroup_13, PAUC26f, Subgroup 15, Elev-16S-1166, AKIW659), *Vicinamibacteria* (Subgroup9, Subgroup 17), *Holophagae* (Subgroup 7).

Most of the OTUs in *Acidobacteriota* belonged to the family *Pyrinomonadaceae* (relative abundance of 1.87%). In soil from the undamaged area, the relative abundance of OTUs of *Pyrinomonadaceae* was 3.3 times higher than in soil from the crater. The *Vicinamibacteraceae* family was slightly less abundant in the soil from the undamaged area (relative abundance 1.73%). In the soil from the crater, the relative

abundance of *Pyrinomonadaceae* OTUs was 4.25 times lower. An increase in the relative abundance of *Solibacteraceae*, *Bryobacteraceae*, *Acidobacteriaceae*_(Subgroup_1), *Blastocatellaceae* was observed in the soil from the crater.

Table 11

Relative abundance of *Acidobacteriota* OTUs in soil samples from the crater and from a visually undamaged area within the military training ground

Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
				Near crater	Crater
<i>Blastocatellia</i>	<i>Pyrinomonadales</i>	<i>Pyrinomonadaceae</i>	<i>RB41</i>	1.87	0.57
	<i>Blastocatellales</i>	<i>Blastocatellaceae</i>	<i>Aridibacter</i>	0.006	0.03
			<i>Blastocatella</i>	0.0006	0.003
	11-24	unidentified	unidentified	0	0.004
	unidentified_ <i>Acidobacteriae</i>	unidentified	<i>Paludibaculum</i>	0.009	0.01
<i>Acidobacteriae</i>	<i>Solibacterales</i>	<i>Solibacteraceae</i>	<i>Candidatus_Solibacter</i>	0.46	1.50
	<i>Bryobacterales</i>	<i>Bryobacteraceae</i>	<i>Bryobacter</i>	0.20	0.11
	<i>Acidobacteriales</i>	<i>Acidobacteriaceae</i> _(Subgroup_1)	<i>Acidipila-Silvibacterium</i>	0	0.27
			<i>Granulicella</i>	0	0.19
			<i>Edaphobacter</i>	0.01	0.04
			<i>Occallatibacter</i>	0.001	0.03
			<i>Terriglobus</i>	0.006	0.02
			unidentified	0	0.01
		<i>Koribacteraceae</i>	<i>Candidatus_Koribacter</i>	0.01	0.09
			<i>Acidicapsa</i>	0	
<i>Thermoanaerobaculia</i>	<i>Thermoanaerobaculales</i>	<i>Thermoanaerobaculaceae</i>	<i>Subgroup_10</i>	0.21	0.22
<i>Vicinamibacteria</i>	<i>Vicinamibacteriales</i>	<i>Vicinamibacteraceae</i>	<i>Vicinamibacter</i>	0.08	0.06
			<i>Luteitalea</i>	0.008	0.002
		unidentified	unidentified	0.05	0.003
<i>Holophagae</i>	<i>Holophagales</i>	<i>Holophagaceae</i>	<i>Geothrix</i>	0	0.005

The identified OTUs of *Acidobacteriota* were distributed across 20 genera. In the soil from the undamaged area, the most abundant OTUs (relative abundance 1.87%) were those of RB41 (unclassified *Acidobacteriota*, published in NCBI Taxonomy as *Acidobacteria bacterium* RB41). In the soil from the crater, their abundance was three times lower. In the soil from the crater, the relative abundance of *Candidatus_Solibacter*, *Bryobacter*, *Candidatus_Koribacter*, *Edaphobacter*, *Occallatibacter*, *Aridibacter*, *Terriglobus*, *Paludibaculum* increased. In addition, the soil from the crater was found to contain *Acidipila-Silvibacterium*, *Granulicella*, *Acidicapsa*, *Geothrix*, and unidentified_11-24 OTUs that were not detected in the soil from the undamaged area.

Chloroflexi OTUs accounted for 7.47% of all detected and identified transcriptional units. The relative abundance of *Chloroflexi* OTUs in soil from the crater was 1.5 times lower than in soil from the area without visible damage. The microorganisms of the *Chloroflexi* phylum were mainly represented by the unclassified (KD4-96, AD3, TK10, Gitt-GS-136, JG30-KF-CM66, OLB14, P2-11E, SHA-26) and classified (*Chloroflexia*, *Dehalococcoidia*, *Ktedonobacteria*, *Anaerolineae*) classes (Table 12). The class *Chloroflexia*

is represented by three orders (*Chloroflexales*, *Thermomicrobiales*, Elev-1554), *Dehalococcoidia* by two (S085, SAR202_clade), *Ktedonobacteria*—three (*Ktedonobacterales*, B12-WMSP1, C0119), and *Anaerolineae*—five (*Anaerolineales*, *Ardenticatenales*, *Caldilineales*, RBG-13-54-9, SBR1031). Among the 16 orders belonging to *Chloroflexi*, the relative abundance of OTUs in 10 orders decreased. Two orders (*Ardenticatenales* and SAR202_clade) were not detected in soil from the crater; however, OTUs of two currently unclassified orders, B12-WMSP1 and Elev-1554, were identified and were absent from soil from the undamaged area. An increase in the relative abundance of OTUs in the soil from the crater was observed for the *Ktedonobacterales* and *Anaerolineales*. At the family level, a similar trend in changes in the relative abundance of OTUs was observed in soil from the crater and the undamaged area.

Table 12

Relative abundance of *Chloroflexi* and *Gemmatimonadota* OTUs in soil samples from the crater and from a visually undamaged area within the military training ground

Phylum	Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
					Near crater	Crater
<i>Chloroflexi</i>	<i>Ktedonobacteria</i>	<i>Ktedonobacterales</i>	<i>JG30-KF-AS9</i>	<i>unidentified</i>	0	0.12
			<i>Ktedonobacteraceae</i>	<i>1921-3</i>	0	0.08
				<i>1959-1</i>	0.003	0.06
				<i>Ktedonobacter</i>	0.003	0.03
				<i>JG30a-KF-32</i>	0.002	0.02
				<i>1921-2</i>	0	0.01
				<i>HSB_OF53-F07</i>	0	0.009
				<i>FCPS473</i>	0	0.006
				<i>Thermosporothrix</i>	0	0.004
	<i>Chloroflexia</i>	<i>Chloroflexales</i>	<i>Chloroflexaceae</i>	<i>FFCH7168</i>	0.02	0.005
			<i>Herpetosiphonaceae</i>	<i>Herpetosiphon</i>	0.01	0.009
		<i>Thermomicrobiales</i>	<i>JG30-KF-CM45</i>	<i>unidentified</i>	0.003	0.008
			<i>Thermomicrobiaceae</i>	<i>Nitrolancea</i>	0	0.008
	<i>Anaerolineae</i>	<i>Caldilineales</i>	<i>Caldilineaceae</i>	<i>Litorilinea</i>	0.01	0
	<i>KD4-96</i>	<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	0.01	0.006
	<i>TK10</i>	<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	0.002	0.0006
<i>Gemmatimonadota</i>	<i>Gemmatimonadetes</i>	<i>Gemmatimonadales</i>	<i>Gemmatimonadaceae</i>	<i>Gemmatimonas</i>	0.22	0.52
				<i>unidentified</i>	0.12	0.05
				<i>Roseisolibacter</i>	0.006	0.006
	<i>Longimicrobia</i>	<i>Longimicrobiales</i>	<i>Longimicrobiaceae</i>	<i>YC-ZSS-LKJ147</i>	0.02	0.03
				<i>Longimicrobium</i>	0	0.001

The relative abundance of *Gemmatimonadota* OTUs in soil from the crater was 1.7 times lower than in soil from the undamaged area (see Table 6). Like the *Chloroflexi*, the *Gemmatimonadota* are represented primarily by unclassified classes (AKAU4049, S0134_terrestrial_group, BD2-11_terrestrial_group). Only two classes, *Gemmatimonadetes* and *Longimicrobia*, have been validly described. In the soil from the crater, the relative abundance of *Gemmatimonadetes*, S0134_terrestrial_group, and BD2-11_terrestrial_group was lower than in the soil from the undamaged area, OTUs of the AKAU4049 group were not detected, and the relative abundance of *Longimicrobia* increased twofold. At lower taxonomic levels, the detected OTUs belonged to the orders *Gemmatimonadales* and *Longimicrobiales*, and the

families *Gemmatimonadaceae* and *Longimicrobiaceae*, within which the genera *Gemmatimonas*, *Roseisolibacter*, *Longimicrobium*, as well as unidentified *Gemmatimonadaceae* and YC-ZSS-LKJ147 were identified. Unlike other genera of the *Gemmatimonadota*, *Longimicrobium* OTUs have been found only in soil from the crater (Table 12).

In soil samples from a visually undamaged area, OTUs of *Bacteroidia* were identified as *Bacteroidia* (0.94%), *Kapabacteria* (0.004%), *Kryptonia* (0.006%), *Ignavibacteria* (0.005%), and *Rhodothermia* (0.001%). In the soil from the crater, the relative abundance of *Bacteroidia* OTUs increased 2.5-fold, that of *Kapabacteria* 4-fold, while the relative abundance of *Ignavibacteria* OTUs decreased 3.5-fold. No *Kryptonia* or *Rhodothermia* OTUs were detected in the soil from the crater (Table 13).

Five orders have been identified within the *Bacteroidia*: *Chitinophagales*, *Sphingobacteriales*, *Cytophagales*, *Flavobacteriales*, and *Bacteroidales*. The most abundant order in the soil from the undamaged area was *Chitinophagales* (0.63%). In the soil from the crater, the relative abundance of OTUs of *Chitinophagales* increased threefold. The relative abundance of OTUs of *Sphingobacteriales*, *Cytophagales*, and *Bacteroidales* also increased in this soil. In both samples studied, *Kapabacteria* were represented by *Kapabacteriales*, *Kryptonia* by *Kryptoniales*, *Ignavibacteria* by SJA-28, and *Rhodothermia* by *Rhodothermales*. At lower taxonomic levels, only *Bacteroidia* OTUs were identified.

At the family level, 22 taxonomic units were identified (*Chitinophagaceae*, *Microscillaceae*, *Flavobacteriaceae*, *Sphingobacteriaceae*, *Saprospiraceae*, *Cytophagaceae*, *Spirosomaceae*, *Crocinitomicaceae*, *Hymenobacteraceae*, *Rhodothermaceae*, *Weeksellaceae*, env.OPS_17, AKYH767, 37-13, NS9_marine_group, FFCH9454, KD3-93, BSV26, NS11-12_marine_group, S15-21, *Prevotellaceae*, LiUU-11-161). In both soil samples, the most abundant family was *Chitinophagaceae* (relative abundance of OTUs in soil from the visually undamaged area was 0.59%, and 1.67% in soil from the crater). In addition to the *Chitinophagaceae*, the soil from the crater showed an increase in the abundance of 10 other families (*Microscillaceae*, env.OPS_17, *Flavobacteriaceae*, *Sphingobacteriaceae*, AKYH767, *Saprospiraceae*, *Cytophagaceae*, *Spirosomaceae*, 37-13, *Hymenobacteraceae*). OTUs from the two families *Prevotellaceae* and S15-21 were detected only in soil from the crater. A decrease in the relative abundance of OTUs in the disturbed soil was observed for NS9_marine_group, FFCH9454, *Crocinitomicaceae*, KD3-93, NS11-12_marine_group, and OTUs of *Rhodothermaceae*, *Weeksellaceae*, BSV26, and LiUU-11-161 were not found. At the genus level, OTUs of *Bacteroidia* were distributed among 34 genera. Changes in their relative abundance are shown in Table 13.

Table 13

Relative abundance of *Bacteroidia* OTUs in soil samples from the crater and from a visually undamaged area within the military training ground

Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
				Near crater	Crater
<i>Bacteroidia</i>	<i>Chitinophagales</i>	<i>Chitinophagaceae</i>	<i>Ferruginibacter</i>	0.05	0.21
			<i>Puia</i>	0.02	0.17
			<i>Terrimonas</i>	0.06	0.17
			<i>Edaphobaculum</i>	0.01	0.08
			<i>Flavisolibacter</i>	0.009	0.05
			<i>Flavitalea</i>	0.02	0.04
			<i>Parafilimonas</i>	0.009	0.04
			<i>Niastella</i>	0.03	0.03

Continued from Table 13

Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
				Near crater	Crater
<i>Bacteroidia</i>	<i>Chitinophagales</i>	<i>Chitinophagaceae</i>	<i>Sediminibacterium</i>	0.0006	0.03
			<i>Segetibacter</i>	0.005	0.03
			<i>Aurantisolimonas</i>	0.01	0.03
			<i>Chitinophaga</i>	0.006	0.02
			<i>unidentified</i>	0.005	0.02
			<i>Heliimonas</i>	0.001	0.01
			<i>UTBCD1</i>	0	0.01
			<i>Pseudoflavitalea</i>	0	0.005
		<i>Saprospiraceae</i>	<i>unidentified</i>	0	0.002
	<i>Flavobacteriales</i>	<i>Flavobacteriaceae</i>	<i>Flavobacterium</i>	0.09	0.11
		<i>Crocinitomicaceae</i>	<i>Fluviicola</i>	0.008	0.006
		<i>Weeksellaceae</i>	<i>Chryseobacterium</i>	0.0006	0
	<i>Sphingobacteriales</i>	<i>Sphingobacteriaceae</i>	<i>Mucilaginibacter</i>	0.005	0.06
			<i>Pedobacter</i>	0.0006	0.004
			<i>Solitalea</i>	0.0006	0
	<i>Cytophagales</i>	<i>Microscillaceae</i>	<i>Chryseolinea</i>	0.008	0.05
			<i>Ohtaekwangia</i>	0.003	0.01
			<i>Hassallia</i>	0.0006	0.005
		<i>Cytophagaceae</i>	<i>Sporocytophaga</i>	0.002	0.008
			<i>Cytophaga</i>	0	0.006
			<i>Rhodocytophaga</i>	0	0.002
		<i>Hymenobacteraceae</i>	<i>Hymenobacter</i>	0.002	0.006
			<i>Adhaeribacter</i>	0.002	0.0006
		<i>Spirosomaceae</i>	<i>Dyadobacter</i>	0.007	0.01
			<i>Fibrella</i>	0	0.001
	<i>Bacteroidales</i>	<i>Prevotellaceae</i>	<i>Prevotellaceae_NK3B31_group</i>	0	0.004

The relative abundance of *Verrucomicrobiota* OTUs in soil from the crater did not increase significantly compared to soil from the undisturbed area. Similar changes in the relative abundance of OTUs were also observed for *Myxococcota* (see Table 6). Changes in the relative abundance of genera belonging to the *Verrucomicrobiota* and *Myxococcota* in soil samples from the crater and visually undamaged area are shown in Table 14.

Table 14

Relative abundance of *Verrucomicrobiota* and *Myxococcota* OTUs in soil samples from the crater and from a visually undamaged area within the military training ground

Phylum	Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
					Near crater	Crater
<i>Verrucomicrobiota</i>	<i>Verrucomicrobiae</i>	<i>Chthoniobacteriales</i>	<i>Chthoniobacteraceae</i>	<i>Candidatus_Udaeobacter</i>	0.61	1.36
				<i>Chthoniobacter</i>	0.15	0.10
			<i>Xiphinematobacteraceae</i>	<i>Candidatus_Xiphinematobacter</i>	0.12	0.27
			<i>Terrimicrobiaceae</i>	<i>Terrimicrobium</i>	0.003	0.008

Continued from Table 14

Phylum	Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
					Near crater	Crater
Verrucomicrobiota	Verrucomicrobiae	Pedosphaerales	Pedosphaeraceae	ADurb.Bin063-1	0.05	0.03
				DEV114	0.01	0
				Ellin517	0.009	0.006
				Ellin516	0.008	0.0006
		Opitutales	Opitutaceae	Pedosphaera	0	0.0006
				Opitutus	0.01	0.02
				Lacunisphaera	0.001	0.007
		Verrucomicrobiales	Verrucomicrobiaceae	Roseimicrobium	0.009	0.01
			Rubritaleaceae	Luteolibacter	0.008	0.006
	Chlamydiae	Chlamydiales	Parachlamydiaceae	Neochlamydia	0.01	0.004
Myxococcota	Polyangia	Haliangiales	Haliangiaceae	Haliangium	0.61	0.86
		Polyangiales	Phaselicystidaceae	Phaselicystis	0.11	0.01
			Polyangiaceae	Pajaroellobacter	0.10	0.05
				Sorangium	0.03	0.002
				Aetherobacter	0.02	0.004
				Minicystis	0.004	0
				Labilithrix	0	0.003
			Sandaracinaceae	Sandaracinus	0.01	0.03
		Nannocystales	Nannocystaceae	Nannocystis	0.004	0.01
		Blfdi19	unidentified_Blfdi19	unidentified_Blfdi19	0.002	0.003
	Myxococcia	Myxococcales	Anaeromyxobacteraceae	Anaeromyxobacter	0.02	0.09
			Myxococcaceae	P3OB-42	0.02	0.02
				KD3-10	0	0.002

While the relative abundance of *Verrucomicrobiota* and *Myxococcota* OTUs in the soil from the crater increased slightly compared to the control, the relative abundance of *Firmicutes* in these two soil samples showed almost no difference (Table 15). The *Firmicutes* phylum was represented by the classes *Bacilli*, *Clostridia*, *Desulfitobacteriia*, *Limnochordia*, and *Negativicutes*. The most abundant class in soil from the undamaged area was *Bacilli* (1.1%). The relative abundance of *Negativicutes* did not change significantly in the soil from the crater. No OTUs of *Limnochordia* were detected in the soil from the crater. In contrast, significant changes in relative abundance were observed for *Clostridia*: of the 14 genera identified in soil from the undamaged area, only 2 were identified in soil from the crater. The relative abundance of *Limnochordia* in soil from an undamaged area is 0.005%, and that of *Clostridia* is 0.2%; therefore, the disappearance or decline in the abundance of these classes likely has no significant effect on the change in the total abundance of *Firmicutes*.

Table 15

Relative abundance of *Firmicutes* OTUs in soil samples from the crater and from a visually undamaged area within the military training range

Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
				Near crater	Crater
<i>Bacilli</i>	<i>Paenibacillales</i>	<i>Paenibacillaceae</i>	<i>Paenibacillus</i>	0.47	0.63
			<i>Cohnella</i>	0.07	0.11
	<i>Bacillales</i>	<i>Bacillaceae</i>	<i>Bacillus</i>	0.47	0.32

Continued from Table 15

Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
				Near crater	Crater
Bacilli	Bacillales	Planococcaceae	<i>Paenisporosarcina</i>	0.008	0.04
			<i>Sporosarcina</i>	0.02	0.03
			<i>Lysinibacillus</i>	0.01	0.008
			<i>Domibacillus</i>	0.002	0.004
			<i>Solibacillus</i>	0.003	0.002
	Alicyclobacillales	Alicyclobacillaceae	<i>Tumebacillus</i>	0.03	0.04
	Thermoactinomycetales	Thermoactinomycetaceae	<i>Shimazuella</i>	0.004	0.02
			<i>Pasteuria</i>	0.004	0.005
	Erysipelotrichales	Erysipelotrichaceae	<i>Turicibacter</i>	0.004	0.004
Clostridia	Brevibacillales	Brevibacillaceae	<i>Brevibacillus</i>	0.002	0.003
	Clostridiales	Clostridiaceae	<i>Clostridium_sensu_stricto_13</i>	0.13	0.07
			<i>Clostridium_sensu_stricto_2</i>	0	0.001
		Caloramatoraceae	<i>Fonticella</i>	0.007	0
		Oxobacteraceae	<i>Oxobacter</i>	0.002	0
	unidentified	Gracilibacteraceae	<i>Gracilibacter</i>	0.01	0
			<i>Lutispora</i>	0.003	0
	Eubacteriales	Alkalibacteraceae	<i>Alkalibacter</i>	0.005	0
	Lachnospirales	Lachnospiraceae	<i>Anaerocolumna</i>	0.004	0
			<i>Mobilitalea</i>	0.004	0
			<i>Lachnospiraceae_NK4A136_group</i>	0.003	0
			<i>Lachnoclostridium</i>	0	0.002
	Oscillospirales	Hungateiclostridiaceae	<i>Ruminiclostridium</i>	0.003	0
			<i>Anaerobacterium</i>	0.002	0
		Oscillospiraceae	<i>Papillibacter</i>	0.002	0
	Christensenellales	Christensenellaceae	<i>Christensenellaceae_R-7_group</i>	0.002	0
	Peptostreptococcales-Tissierellales	Peptostreptococcaceae	<i>Sporacetigenium</i>	0.0006	0
Desulfitobacteria	Desulfitobacteriales	Desulfitobacteriaceae	<i>Desulfosporosinus</i>	0.02	0.005
Negativicutes	Veillonellales-Selenomonadales	Sporomusaceae	<i>Pelosinus</i>	0	0.003
			<i>Anaerosinus</i>	0.0006	0.001

Table 16 shows the distribution of OTUs among genera belonging to phyla whose share of OTUs in the soil metagenome does not exceed 1%. The OTUs of *Methylomirabilota*, *Latescibacterota*, *Margulisbacteria*, *Elusimicrobiota*, *Zixibacteria* and unclassified *RCP2-54*, *MBNT15*, *NB1-j*, *WPS-2*, *Dependentiae*, *SAR324_clade (Marine_group_B)*, *FCPU426* were identified only at the phylum level.

Table 16

Relative abundance of OTUs from other phyla in soil samples collected from the crater and from a visually undamaged area within the military training ground

Phylum	Class	Order	Family	Genus	Genus, relative abundance	
					Near crater	Crater
<i>Nitrospirota</i>	<i>Nitrospiria</i>	<i>Nitrospirales</i>	<i>Nitrospiraceae</i>	<i>Nitrospira</i>	0.77	0.20
<i>Desulfobacterota</i>	<i>Desulfuromonadia</i>	<i>Geobacterales</i>	<i>Geobacteraceae</i>	<i>Citri fermentans</i>	0.01	0.004
	<i>Desulfovibrionia</i>	<i>Desulfovibrionales</i>	<i>Desulfovibrionaceae</i>	<i>Desulfovibrio</i>	0.0006	0.003
<i>Armatimonadota</i>	<i>Chthonomonadetes</i>	<i>Chthonomonadales</i>	<i>Chthonomonadaceae</i>	<i>Chthonomonas</i>	0.01	0.09
	<i>Fimbriimonadia</i>	<i>Fimbriimonadales</i>	<i>Fimbriimonadaceae</i>	<i>Fimbriimonas</i>	0.003	0
<i>Bdellovibrionota</i>	<i>Bdellovibrionia</i>	<i>Bdellovibrionales</i>	<i>Bdellovibrionaceae</i>	<i>Bdellovibrio</i>	0.03	0.06
				<i>OM27_clade</i>	0.03	0.01
	<i>Oligoflexia</i>	<i>0319-6G20</i>	<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	0.008	0.009
<i>Entotheonellaeota</i>	<i>Entotheonellia</i>	<i>Entotheonellales</i>	<i>Entotheonellaceae</i>	<i>Candidatus_ Entotheonella</i>	0.001	0
<i>Patescibacteria</i>	<i>Parcubacteria</i>	<i>Candidatus_ Jorgen senbacteria</i>	<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	0	0.004
		<i>Candidatus_ Liptonbacteria</i>	<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	0.002	0
		<i>Candidatus_ Zambryskibacteria</i>	<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	0.002	0
		<i>Candidatus_ Yanofskybacteria</i>	<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	0.001	0
	<i>Saccharimonadia</i>	<i>Saccharimonadales</i>	<i>Saccharimonadaceae</i>	<i>TM7a</i>	0.0006	0.004
			<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	0.0006	0.004
	<i>WWE3</i>	<i>unidentified_ WWE3</i>	<i>unidentified_ WWE3</i>	<i>unidentified_ W WE3</i>	0.001	0
<i>Planctomycetota</i>	<i>Planctomycetes</i>	<i>Isosphaerales</i>	<i>Isosphaeraceae</i>	<i>Aquisphaera</i>	0.0006	0.007
				<i>Singulisphaera</i>	0.006	0.004
				<i>Tundrisphaera</i>	0.002	0
		<i>Pirellulales</i>	<i>Pirellulaceae</i>	<i>Pir4_lineage</i>	0.003	0.001
				<i>Pirellula</i>	0.002	0
	<i>Phycisphaerae</i>	<i>Planctomycetales</i>	<i>Rubinisphaeraceae</i>	<i>SH-PL14</i>	0.0006	0
		<i>Phycisphaerales</i>	<i>Phycisphaeraceae</i>	<i>SM1A02</i>	0	0.002
<i>Cyanobacteria</i>	<i>Cyanobacteriia</i>	<i>Tepidisphaerales</i>	<i>WD2101_soil_group</i>	<i>unidentified</i>	0.002	0.001
		<i>Chloroplast</i>	<i>unidentified</i>	<i>unidentified</i>	0.006	0.01
		<i>Cyanobacteriales</i>	<i>Coleofasciculaceae</i>	<i>Microcoleus_ SAG_1449-1a</i>	0.001	0.002
			<i>Phormidiaceae</i>	<i>Tychonema_ CCAP_1459-11B</i>	0.0006	0.0006
<i>Fibrobacterota</i>	<i>Fibrobacteria</i>	<i>Fibrobacterales</i>	<i>Fibrobacteraceae</i>	<i>possible_ genus_04</i>	0.008	0.03
				<i>unidentified</i>	0.008	0.02
<i>Sumerlaeota</i>	<i>Sumerlaeia</i>	<i>Sumerlaeales</i>	<i>Sumerlaeaceae</i>	<i>Sumerlaea</i>	0.03	0.03
<i>Deinococcota</i>	<i>Deinococci</i>	<i>Deinococcales</i>	<i>Deinococcaceae</i>	<i>Deinococcus</i>	0	0.0006

A visual analysis of the distribution of microbial populations indicates a significant restructuring of microbial communities: the metagenome of soil from the crater shows a marked dominance of the genera *Mycobacterium*, *Acidothermus*, *Candidatus Solibacter*, and *Bradyrhizobium*. At the same time, the soil metagenome from a visually undamaged area revealed a significantly higher proportion of sequences belonging to the RB41 group, the genera *Nocardioides* and *Gaiella*, and the archaeon *Nitrososphaera* (Fig. 3).

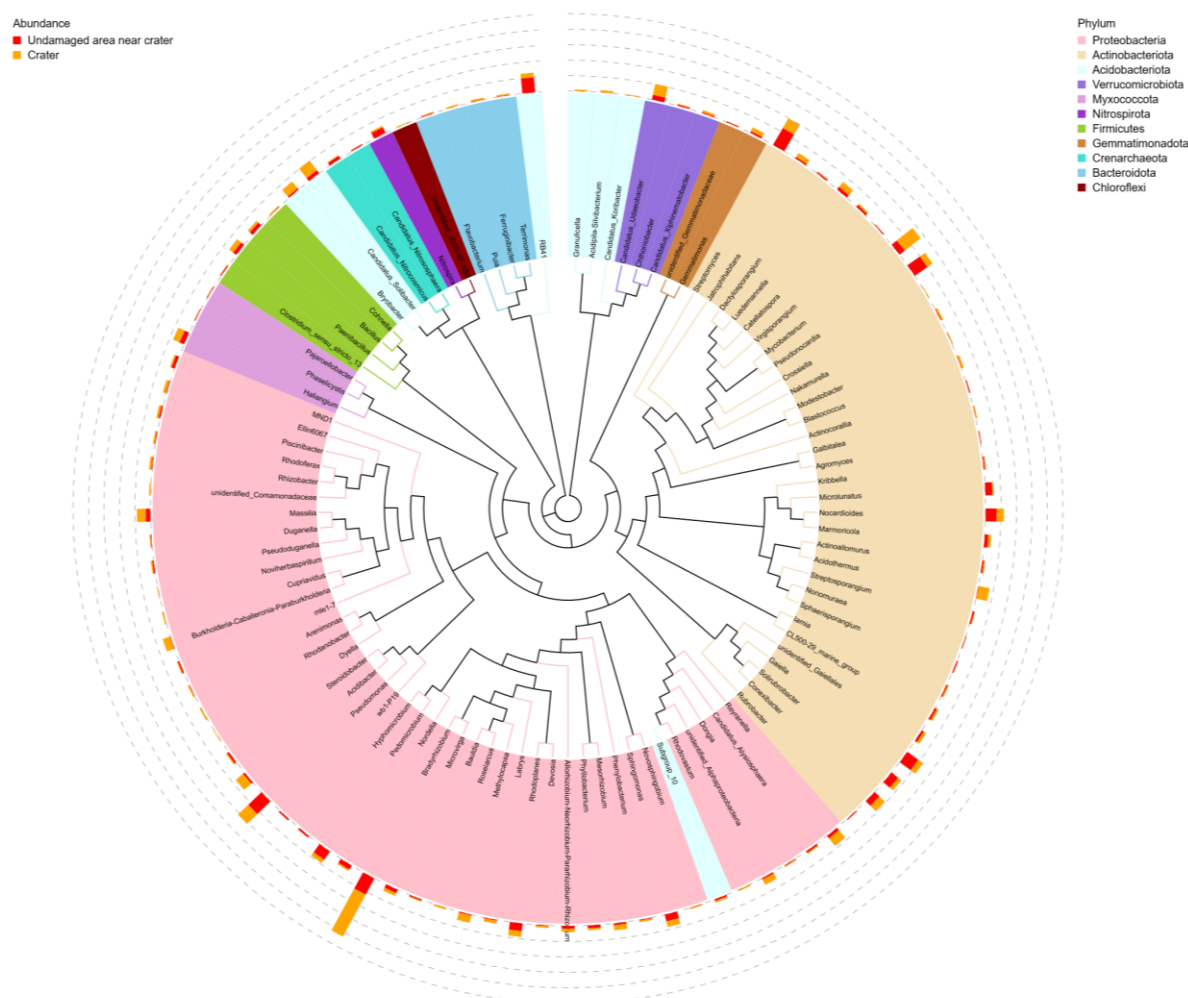


Figure 3. Taxonomic structure and comparative analysis of the bacterial communities in the studied soils at the genus level. The colors of the sectors correspond to phyla, and the outer histograms represent the relative abundance of taxa

This phylogenetic tree structure clearly demonstrates not only the high biodiversity of the studied soils but also a shift in the dominant groups. The displacement of typical soil taxa and the accumulation of stress-tolerant representatives of *Actinobacteria* and *Proteobacteria* underscore the formation of a specific adaptive complex of microorganisms in the studied soils.

CONCLUSIONS

Studies have shown that ammunition explosions at military training grounds significantly affect the physical, physicochemical, and biological properties of the soil. Mechanical mixing of the layers and thermal degradation alter their grain size distribution (the proportion of silt increases, while that of clay decreases). Although the soils remain sandy, an increase in their specific surface area may subsequently

alter their absorption capacity. Physical and chemical degradation is manifested by a decrease in humus content, an increase in hydrolytic acidity, and a reduction in the amount of absorbed bases, which impairs soil fertility and suppresses soil ecosystems.

Heavy metal contamination was also detected: MPCs for Cu, Cr, and Zn were exceeded, and concentrations of Cu, Cr, Hg, and Se were significantly higher than in visually undamaged soil. The concentrations of chromium and copper showed the greatest increase, indicating the specific nature of the munitions. The spatial variability of military contamination in Ukraine depends on the intensity of combat and the types of weaponry used, which requires a tailored approach to reclamation and bioremediation.

In addition, microbial communities have undergone changes: sensitive groups of microorganisms have been displaced by stress-resistant bacteria, a phenomenon typical of industrial areas that poses a threat to biogeochemical processes and soil recovery. Metagenomic analysis showed that ammunition explosions alter the microbiome structure, but it generally retains high diversity and functional stability. High Shannon and Simpson indices indicate the ecological plasticity of the bacterial community, which can sustain biogeochemical processes. At the same time, the decrease in alpha diversity in the crater indicates the selective elimination of sensitive and rare microorganisms. Analysis of OTUs revealed a significant proportion of shared taxa, confirming the presence of a stable “core” of the microbiome. Unique OTUs indicate adaptation to new conditions; however, the decrease in their number in the crater demonstrates the vulnerability of rare members of the microbiota to explosive impacts.

Bacteria were the dominant group among the prokaryotes; the percentage of archaea was lower and decreased significantly in the crater (particularly among representatives of the *Crenarchaeota* and *Thermoplasmatota*). The most sensitive organisms were nitrifying archaea of the family *Nitrososphaeraceae* (*Candidatus Nitrocosmicus*, *Candidatus Nitrososphaera*, *Candidatus Nitrosotenuis*), indicating a risk of disruption to the nitrogen cycle. Among the dominant bacteria in the crater, the proportion of *Proteobacteria* and *Acidobacteriota* increased, while the abundance of *Actinobacteriota* decreased. An increase in the abundance of *Rhizobiales*, *Burkholderiales*, *Bradyrhizobium*, and *Massilia* indicates adaptation to stress and the potential degradation of pollutants. Conversely, the suppression of typical actinobacteria (*Streptomyces*, *Pseudonocardia*) may inhibit humus formation processes.

A notable feature is the increase in the abundance of *Mycobacterium* in the crater and the emergence of genera not detected in the soil from the undamaged area, confirming the creation of specific ecological niches for stress-resistant microorganisms. Thus, military activity significantly alters the soil microbiome. These findings are important for assessing the ecological condition of disturbed areas and developing methods for their bioremediation.

Acknowledgements The authors are grateful to the Explogen employee for performing the metagenomic analysis of the soil samples.

Funding This study was performed and funded under the Ministry of Education and Science of Ukraine project “Development of an approach to restore soil fertility in soils affected by hostilities using microbial biological preparations” (Grant number 0124U000931).

ТРАНСФОРМАЦІЯ БІОЛОГІЧНИХ ЗАГРОЗ В УМОВАХ ВОЄННИХ КОНФЛІКТІВ: НОВІ ІНФЕКЦІЙНІ ВИКЛИКИ, БІОТЕРОРИЗМ ТА МЕДИКО-ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ

TRANSFORMATION OF BIOLOGICAL THREATS IN THE CONTEXT OF MILITARY CONFLICTS: NEW INFECTIOUS CHALLENGES, BIOTERRORISM AND MEDICAL-ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES

Гута Соломія Іванівна, кандидат медичних наук, доцент, ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького», solomia.guta@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7943-0139>

Кобак Любов Орестівна, кандидат медичних наук, ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького», k_liubov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2700-4007>

Бекесевич Анна Михайлівна, кандидат медичних наук, доцент, ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького», bekesevychanna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9385-9786>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.09>

Анотація. У розділі монографії здійснено системний медико-епідеміологічний аналіз механізмів зміни біологічних, хімічних та екологічних загроз в умовах воєнних дій. Обґрунтовано патогенетичні детермінанти інтенсифікації епідемічного процесу, спричинені руйнуванням об'єктів критичної інфраструктури, знищенням природних біотопів та міграцією переносників зоонозних інфекцій. Особливу увагу приділено еволюції ранових інфекцій та селекції госпітальних штамів із множинною антибіотикорезистентністю в умовах евакуаційних ланцюгів військової медицини. Проаналізовано сучасні загрози біотероризму, пов'язані з розвитком синтетичної біоінженерії та технологій штучного редагування геному, визначено медичні характеристики патогенів категорій А, В, С за класифікацією Центрів з контролю та профілактики захворювань США та критерії диференціальної діагностики навмисного поширення біологічних агентів від природних спалахів інфекційних захворювань. Досліджено патофізіологічний характер впливу хіміко-екологічного токсичного стресу воєнного часу на формування вторинних імунодефіцитних станів. Запропоновано комплекс стратегічних рекомендацій для медичної служби, що включає впровадження високотехнологічних методів секвенування нового покоління.

Ключові слова: біобезпека, військова епідеміологія, біотероризм, антибіотикорезистентність, токсико-хімічний імунодефіцит, патогени.

Abstract. The monograph chapter presents a systematic medical and epidemiological analysis of the mechanisms underlying changes in biological, chemical, and environmental threats in the context of military operations. The pathogenetic determinants of the intensification of the epidemic process, caused by the destruction of critical infrastructure, the destruction of natural habitats, and the migration of vectors of zoonotic infections, are substantiated. Particular attention is paid to the evolution of wound infections and the selection of hospital strains with multiple antibiotic resistance within the evacuation chains of military medicine. Current bioterrorism threats associated with the development of synthetic bioengineering and genome editing technologies are analyzed, and the medical characteristics of Category

A, B, C according to the classification of the U.S. Centers for Disease Control and Prevention, and the criteria for the differential diagnosis of the deliberate release of biological agents from natural outbreaks of infectious diseases. The pathophysiological nature of the impact of wartime chemical and environmental toxic stress on the development of secondary immunodeficiency states has been investigated. A set of strategic recommendations for the medical service has been proposed, including the implementation of next-generation high-tech sequencing methods.

Keywords: biosecurity, military epidemiology, bioterrorism, antimicrobial resistance, toxic-chemical immunodeficiency, pathogens.

ВСТУП

Сучасні збройні конфлікти характеризуються значною трансформацією засобів ведення війни, що виходить за межі суто механічного ураження та набуває ознак комплексного еколого-техногенного й біологічного руйнування¹. Традиційна доктрина військової медицини тривалий час розглядала інфекційну захворюваність переважно як побічний фактор руйнування, зумовлений погіршенням умов перебування військ та цивільного населення. Проте події усіх геополітичних протистоянь ХХІ століття вимагають оновлення парадигми національної безпеки з акцентом на системний медико-біологічний захист. Стрімкий розвиток біотехнологій подвійного призначення на тлі розмивання міжнародно-правових інструментів контролю створює передумови для формування принципово нових загроз, здатних викликати неконтрольовані пандемічні кризи у зонах бойових дій.

У межах сучасної військово-медичної науки важливого значення набуває чітка диференціація та визначення ключових понять біобезпеки:

- «новітні біологічні загрози» – це ризики, пов'язані з появою раніше невідомих патогенів, поверненням (еволюційною реевакуацією) елімінованих інфекцій або раптовим поширенням відомих збудників у нові географічні зони внаслідок антропогенного руйнування екосистем чи набуття мікроорганізмами штучних властивостей вірулентності та резистентності².

- «навмисне використання патогенів» – цілеспрямоване, приховане або відкрите розповсюдження біологічних агентів, вірусів, бактерій чи токсинів з метою ураження живої сили, деморалізації та виснаження системи охорони здоров'я противника в межах асиметричного ведення війни³.

Існує жорсткий патогенетичний та епідеміологічний взаємозв'язок між руйнуванням матеріальної інфраструктури в зонах конфлікту та активацією епідемічних процесів⁴. Воєнний екоцид, що супроводжується знищенням гідротехнічних споруд, хімічним забрудненням територій та руйнуванням лісових і степових масивів пожежами, діє як синергічний тригер. Екологічний та хімічний колапс неминуче перетворюється у кризу громадського здоров'я: інгаляційний та аліментарний токсичний стрес викликає вторинні імунodefіцитні стани у населення, паралельно руйнуючи природні бар'єри стримування зоонозних і сапронозних інфекцій⁵. Таким чином, штучно

¹ Connolly, M. A., M. Gayer, R. Y. Ryan, P. Salama, P. Spiegel, and D. L. Heymann, 'Communicable diseases in complex emergencies: impact and challenges', *The Lancet*, vol. 364, no. 9449, 2004, pp. 1974–1983.

² National Academy of Sciences, *Biodefense in the Age of Synthetic Biology*, Washington, DC, The National Academies Press, 2022.

³ Gayer, M., D. Legros, P. Formenty, and M. A. Connolly, 'Conflict and emerging infectious diseases', *Emerging Infectious Diseases*, vol. 13, no. 11, 2007, pp. 1625–1631.

⁴ Kouadio, I. K., S. Aljunid, T. Kamigaki, K. Hammad, and H. Oshitani, 'Infectious diseases following natural disasters and conflicts: a common risk profile', *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, vol. 6, no. 4, 2012, pp. 423–433.

⁵ Al-Shaikhli, H. K., and A. M. Al-Mahdawi, 'Impact of warfare on the emergence of zoonotic and vector-borne diseases', *Veterinary World*, vol. 16, no. 2, 2023, pp. 311–320.

створене деструктивне середовище збільшує ризики як природних спалахів інфекційних хвороб, так і потенційних актів біотероризму, перетворюючи території ведення бойових дій на зону високого біологічного ризику.

Метою цього дослідження є системний медико-епідеміологічний аналіз механізмів трансформації біологічних, хімічних та екологічних загроз в умовах сучасних збройних конфліктів, обґрунтування патогенетичних і детермінантних зв'язків між руйнуванням довкілля та інтенсифікацією епідемічного процесу, а також верифікація новітніх ризиків біотероризму для розробки стратегічних рекомендацій щодо модернізації системи національної біобезпеки і медичного захисту населення.

Матеріалами дослідження слугували офіційні звітні, аналітичні та нормативно-директивні документи Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), Центрів з контролю та профілактики захворювань, Європейського центру з профілактики та контролю захворюваності, Спільного дослідницького центру Європейської Комісії, присвячені біобезпеці та медицині катастроф за період 2004–2026 рр., наукові публікації, результати клінічних, епідеміологічних та експериментальних досліджень у провідних міжнародних рецензованих виданнях, індексованих у наукометричних базах даних PubMed, Scopus та Web of Science.

1. ЕПІДЕМІОЛОГІЧНІ ДЕТЕРМІНАНТИ ВОЄННОГО ЧАСУ: МЕХАНІЗМИ АКТИВАЦІЇ ІНФЕКЦІЙНИХ ХВОРОБ

Збройні конфлікти традиційно виступають потужними каталізаторами руйнування систем охорони здоров'я та радикальної перебудови екологічних ніш, що неминуче призводить до інтенсифікації епідемічного процесу. В умовах ведення бойових дій класична тріада епідеміології (джерело збудника, механізм передачі та сприйнятливий організм) зазнає істотних змін, які зумовлюють вихід інфекційної захворюваності за межі прогнозованих спорадичних рівнів.

Руйнування санітарно-гігієнічних бар'єрів та фекально-оральний механізм. Критичним фактором ризику для популяційного здоров'я є масштабне пошкодження об'єктів критичної інфраструктури, зокрема централізованих систем водопостачання, водовідведення та очищення стічних вод⁶. Пошкодження гідротехнічних споруд призводить до формування стійкого гідрогенного фактора передачі збудників, коли змішування неочищених побутових стоків із питною водою в умовах зруйнованих трубопроводів створює передумови для спалахів гострих кишкових інфекцій високої інтенсивності.

Особливу загрозу становить потенційне повернення в епідемічний простір таких суворих антропонозів, як холера (*Vibrio cholerae*) та черевний тиф (*Salmonella enterica* subsp. *Enterica* serovar Typhi)⁷. Порушення дезінфекційного режиму та відсутність лабораторно-інструментального контролю якості води унеможливають своєчасне виявлення та розпізнавання патогенів. Окрім бактеріальних агентів, суттєво зростає питома вага вірусних ентеропатогенів, зокрема вірусу гепатиту А та ротавірусів⁸. За умов нестачі питної води люди не можуть дотримуватися належної гігієни, через що інфекції стрімко поширюються. В таких умовах водяні спалахи інфекцій переходять у тривалі контактнo-побутові епідемії серед цивільного населення та військових у зонах гуманітарної катастрофи.

⁶ World Health Organization, Infectious disease risks in countries affected by armed conflict: operational guidelines for medical services, Geneva, World Health Organization, 2022.

⁷ Те ж саме [6].

⁸ Seimenis, A., and E. Angelakis, 'Waterborne and foodborne diseases in conflict areas: epidemiological challenges', Clinical Microbiology and Infection, vol. 29, no. 4, 2023, pp. 432–438.

Чинник скупченості, вимушеної міграції та аерогенні інфекції

Масове переміщення великої кількості людей (внутрішньо переміщені особи та біженці), а також тривале їх перебування у непристосованих укриттях, бомбосховищах чи наметових таборах, формує феномен екстремальної кумуляції сприйнятливого контингенту⁹. Головною детермінантою тут стає різке зменшення питомої площі на одну особу та незадовільна вентиляція закритих просторів, що є оптимальним для реалізації аспіраційного (аерозольного та крапельного) механізму передачі.

У медичній практиці воєнного часу це маніфестує стрімким зростанням захворюваності на туберкульоз (*Mycobacterium tuberculosis*), дифтерію (*Corynebacterium diphtheriae*), кір та менінгококову інфекцію (*Neisseria meningitidis*)¹⁰.

Додатково ситуацію ускладнює руйнування планових програм імунопрофілактики. Зниження колективного імунітету серед дитячого та дорослого населення на тлі високої контагіозності, наприклад, вірусу кори чи дифтерії, здатне спровокувати вибухові спалахи, які швидко виснажують обмежені ресурси локальних медичних установ. Особливу небезпеку становлять генералізовані форми менінгококової інфекції, перебіг яких у польових умовах часто завершується летально через несвоєчасне виявлення початкових симптомів та дефіцит специфічних сироваток.

Активізація природних осередків та зоонозні інфекції

Бойові дії супроводжуються глибокою експлуатацією та руйнуванням природних ландшафтів. Артилерійські обстріли, мінні поля та масштабні лісові пожежі викликають вимушену міграцію диких тварин та гризунів. Це суттєво підвищує ризик поширення природно-осередкових інфекцій, оскільки саме ці тварини є основними переносниками та джерелами багатьох збудників хвороб¹¹.

Руйнування міської інфраструктури, накопичення твердих побутових відходів та припинення заходів із дератизації призводять до вибухоподібного зростання популяції щурів і мишей, які мігрують ближче до місць перебування людей.

З медичної точки зору це активує ризики зараження людини лептоспірозом (*Leptospira interrogans*), туляремією (*Francisella tularensis*) та геморагічною гарячкою з нирковим синдромом (ГГНС, зумовленою хантавірусами) [9]. Основними шляхами інфікування стають аліментарний (через їжу, забруднену екскрементами гризунів), контактний (при мікротравмах шкіри під час фортифікаційних робіт) та аспіраційний (у разі вдихання пилу, що містить висушені виділення тварин). Клінічна підступність цих нозологій полягає в тому, що їхній початковий гарячковий синдром є неспецифічним, а розвиток важких ускладнень (гостра ниркова або печінкова недостатність, синдром дисемінованого внутрішньосудинного зсідання) вимагає високотехнологічної інтенсивної терапії, яка часто недоступна в зонах конфлікту.

Ранова інфекція та криза антибіотикорезистентності

Специфічним медичним викликом у структурі воєнної патології є еволюція ранових інфекцій. Сучасна вогнепальна та мінно-вибухова травма характеризується великою зоною некрозу тканин, масивним первинним забрудненням ґрунтом, шматками одягу та уламками снарядів, що створює ідеальне анаеробне середовище для розвитку анаеробної інфекції та гнійно-запальних процесів¹².

⁹ Lam, E., A. McCarthy, and M. Brennan, 'Emerging infectious diseases and forced population displacement during humanitarian crises', *MMWR Recommendations and Reports*, vol. 70, no. 3, 2021, pp. 1–18.

¹⁰ Те саме [8.]

¹¹ Hotez, P. J., W. A. Al-Ansi, and A. Al-Tayar, 'Armed conflict and the collapse of zoonotic disease control: leptospirosis and tularemia in war zones', *PLOS Neglected Tropical Diseases*, vol. 16, no. 5, 2022, e0010420.

¹² Beyrouthy, R., J. Bareyre, F. Robin, and R. Bonnet, 'Antimicrobial resistance in wartime: the silent threat of ESKAPE pathogens', *The Lancet Infectious Diseases*, vol. 23, no. 8, 2023, pp. e290–e300.

Проте найбільш загрозливою тенденцією медичної науки XXI століття в умовах війни є стрімке поширення госпітальних (нозокоміальних) штамів мікроорганізмів із множинною та екстремальною стійкістю до антимікробних препаратів¹³. Евакуаційні ланцюги, переповненість польових госпіталів та вимушене емпіричне призначення антибіотиків широкого спектра дії без попереднього бактеріологічного дослідження створюють потужний селективний тиск. Як наслідок, ранові поверхні пацієнтів колонізуються так званими патогенами групи ESKAPE (*Enterococcus faecium*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa* та *Enterobacter* spp.).

Особливе місце посідає *Acinetobacter baumannii*, який демонструє резистентність майже до всіх доступних класів антибіотиків, включно з карбапенемами та колістином¹⁴. Інфікування такими штамми різко збільшує частоту хронічного остеомієліту, незагоєння ран, ампутацій кінцівок та виникнення генералізованого сепсису з високим рівнем летальності. Більше того, поранені військові та цивільні особи стають резервуарами суперрезистентних бактерій, поширюючи їх у тиліві цивільні стаціонари та за межі країни, що перетворює локальну проблему ранових інфекцій на глобальну загрозу для світової системи охорони здоров'я.

2. СУЧАСНИЙ БІОТЕРОРИЗМ ЯК ЗБРОЯ АСИМЕТРИЧНОЇ ВІЙНИ

У сучасній архітектурі асиметричних воєнних конфліктів біотероризм розглядається не лише як засіб прямого ураження живої сили, а і як інструмент стратегічного деструктивного впливу на систему охорони здоров'я, соціально-економічну стабільність та психологічну стійкість суспільства. Приховане застосування патогенних біологічних агентів в умовах активних бойових дій дозволяє нівелювати класичні системи військового захисту та маскувати навмисні атаки під природні спалахи інфекційних хвороб.

Медико-біологічна класифікація критичних біологічних агентів (табл. 1). Для систематизації рівнів загроз військово-медичні служби світу використовують класифікацію Центрів з контролю та профілактики захворювань США (CDC), яка поділяє потенційні агенти біотероризму на три категорії (A, B, C) на основі їх контагіозності, летальності, стабільності у навколишньому середовищі та складності забезпечення медичної відповіді¹⁵.

Таблиця 1

Класифікація біологічних агентів

Категорія	Характеристика	Основні збудники / токсини	Особливості
Категорія А	Патогени найвищого пріоритету	Сибірка (<i>Bacillus anthracis</i>), чума (<i>Yersinia pestis</i>), натуральна віспа (<i>Variola major</i>), ботулізм (<i>Clostridium botulinum</i>), туляремія (<i>Francisella tularensis</i>), вірусні геморагічні гарячки (Ебола, Марбург, Ласса)	Найбільш небезпечні агенти біологічної зброї
Категорія В	Патогени із помірною здатністю до поширення та нижчою летальністю	Бруцельоз (<i>Brucella</i> spp.), сап (<i>Burkholderia mallei</i>), меліоїдоз (<i>Burkholderia pseudomallei</i>), Ку-гарячка (<i>Coxiella burnetii</i>), рицин, стафілококовий ентеротоксин В	Потребують розширення лабораторної та діагностичної бази для своєчасного виявлення
Категорія С	Перспективні патогени	Вірус Ніпах, хантавіруси, збудники жовтої гарячки, SARS-CoV, MERS-CoV	Мають високий потенціал масового поширення та значної смертності

¹³ Те саме [11].

¹⁴ Те саме [11].

¹⁵ Centers for Disease Control and Prevention, 'Emergency Preparedness and Response: Bioterrorism Agents/Diseases', CDC Official Guidelines, 2023, pp. 12–25.

- Категорія А: включає патогени найвищого пріоритету, що становлять критичну загрозу для національної безпеки через легкість поширення або передачі від людини до людини, високі рівні смертності та спроможність викликати паніку. Основними нозологіями є сибірка (*Bacillus anthracis*), чума (*Yersinia pestis*), натуральна віспа (*Variola major*), ботулізм (ботулінічний токсин виробництва *Clostridium botulinum*), туляремія (*Francisella tularensis*) та вірусні геморагічні гарячки (Ебола, Марбург, Ласса)¹⁶. Патогенні особливості цих агентів, зокрема здатність спороутворюючих форм *Bacillus anthracis* зберігати життєздатність у ґрунті десятиліттями, роблять їх класичними інструментами ведення біологічної війни.

- Категорія В: охоплює патогени з помірною легкістю поширення, відносно низькими показниками летальності, але високим рівнем інвалідизації, що потребує специфічного розширення діагностичних потужностей. Сюди відносять збудників бруцельозу (*Brucella* spp.), сапу (*Burkholderia mallei*), меліюїдозу (*Burkholderia pseudomallei*), Ку-гарячки (*Coxiella burnetii*), а також токсини, такі як рицин (екстракт *Ricinus communis*) та стафілококовий ентеротоксин В¹⁷.

- Категорія С: включає перспективні патогени, які можуть бути оптимізовані для масового розповсюдження у майбутньому через доступність, легкість виробництва та високий потенціал смертності. До цієї групи належать вірус Ніпах, хантавіруси, збудники жовтої гарячки та коронавіруси з високим пандемічним потенціалом (SARS-CoV, MERS-CoV)¹⁸.

Синтетична біоінженерія та технології CRISPR як новітні чинники біозагрози

Розвиток методів штучної біології та технологій точного редагування геному (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats-Crispr-associated protein 9, CRISPR-Cas9) радикально змінив характер потенційних біологічних загроз, нівелювавши природні еволюційні бар'єри патогенів. Сучасні концепції досліджень подвійного призначення, що викликають занепокоєння (Dual-Use Research of Concern, DURC), вказують на технічну можливість штучного створення мікроорганізмів із заданими бойовими характеристиками¹⁹.

Основними векторами застосування генетичної інженерії в інтересах біотероризму є:

1. Штучна індукція резистентності: впровадження у плазмиди бактерій (наприклад, *Yersinia pestis* або *Bacillus anthracis*) генів, які кодують стійкість до антибіотиків першої та другої лінії вибору (фторхінолонів, доксицикліну), що повністю руйнує стандартні медичні протоколи екстреної профілактики та лікування²⁰.

2. Посилення вірулентності та контагіозності: модифікація поверхневих антигенів та білків адгезії вірусів для розширення їхнього тканинного тропізму або полегшення аерозольного шляху передачі, що дозволяє локальному збуднику набути ознак пандемічного агента²¹.

3. Синтез *de novo* згаслих патогенів: успішні експерименти із хімічного синтезу вірусу віспи коней продемонстрували можливість штучного відтворення елімінованого вірусу натуральної віспи людини за відсутності доступу до живих природних штамів із сертифікованих сховищ²².

¹⁶ Henderson, D. A., 'The Looming Threat of Bioterrorism', Science, vol. 283, no. 5406, 1999, pp. 1279–1282.

¹⁷ Greenfield, R. A., B. R. Bronze, 'Bioterrorism: Category A and B Agents', The American Journal of the Medical Sciences, vol. 326, no. 4, 2003, pp. 187–203.

¹⁸ Khan, A. S., S. Morse, 'Emerging Infectious Diseases and Potential Biological Weapons', Clinical Microbiology Reviews, vol. 13, no. 4, 2000, pp. 498–512.

¹⁹ National Research Council, Biotechnology Research in an Age of Terrorism, Washington, DC, National Academies Press, 2004.

²⁰ Inglesby, T. V., T. O'Toole, 'Bioterrorism as a Public Health Threat', Dermatologic Clinics, vol. 22, no. 3, 2004, pp. 235–244.

²¹ Relman, D. A., 'Synthetic Biology and the Risk of New Microbes', The New England Journal of Medicine, vol. 362, no. 2, 2010, pp. 101–103.

²² Noyce, R. S., S. Lederman, and D. H. Evans, 'Construction of an Infectious Horsepox Virus from Chemically Synthesized DNA Fragments', PLOS ONE, vol. 13, no. 1, 2018, e0188453.

4. Екологічний та сільськогосподарський біотероризм (агробіотероризм) створення штамів фітопатогенів або зоопатогенів (наприклад, вірусу африканської чуми свиней чи збудника лінійної іржі пшениці), стійких до температурних коливань та фунгіцидів, з метою штучного провокування продовольчої кризи у зоні воєнного конфлікту.

Проблеми у розпізнаванні навмисного поширення патогенів від природних спалахів інфекцій

Найбільш складним завданням військової епідеміології в умовах війни є виявлення факту навмисного вивільнення (деліберативного релізу) біологічного агента та його диференціація від природних спалахів інфекційних захворювань, які виникають спонтанно через руйнування санітарної інфраструктури.

Для клінічного розпізнавання факту біологічної атаки медична служба керується епідеміологічними критеріями оцінки аномальних спалахів²³:

- епідеміологічна крива: природні епідемії мають пологий характер виникнення через поступове залучення контактних осіб, тоді як у разі штучного аерозольного розпилення фіксується вибухове зростання кількості хворих протягом короткого інкубаційного періоду (ефект «точкового джерела»).
- аномальний географічний або сезонний розподіл: реєстрація випадків тропічних геморагічних гарячок у помірних широтах у зимовий період або виникнення спалаху легеневої форми чуми без наявності ензоотичного осередку та без контакту з хворими тваринами.
- незвичайні клінічні ознаки та шляхи інфікування: переважання інгаляційних (легеневих) форм при захворюваннях, для яких у природі характерний контактний або трансмісивний шлях передачі (наприклад, сибірка, туляремія).
- множинність вогнищ та штамів: одночасна поява спалахів в ізольованих один від одного військових гарнізонах чи цивільних районах, а також виділення з ранових поверхонь або біологічних рідин хворих штамів патогенів із нетиповими генетичними маркерами або ідентичним профілем штучної антибіотикорезистентності²⁴.

Рішення цієї проблеми потребує впровадження систем синдромного моніторингу, розгортання мобільних лабораторій високого рівня біологічного захисту та масового застосування методів геномного секвенування нового покоління для негайної ідентифікації штучних генетичних вставок безпосередньо у зоні ведення бойових дій.

3. СИНЕРГІЧНИЙ ВПЛИВ ХІМІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ІМУННИЙ СТАТУС НАСЕЛЕННЯ

Медичні наслідки сучасних збройних конфліктів не обмежуються прямим впливом біологічних агентів. Масштабне хімічне забруднення територій та руйнування екосистем діють як потужні епідеміологічні тригери, що кардинально змінюють чутливість макроорганізму до інфекцій. Формується складний патогенетичний синергізм, за якого техногенний деструктивний тиск воєнного часу виступає первинним фактором імуносупресії²⁵.

Токсико-хімічний імунодефіцит воєнного походження. Масовані артилерійські обстріли, ракетні удари та руйнування промислових об'єктів супроводжуються постійним викидом у

²³ World Health Organization, Public Health Response to Biological and Chemical Weapons: WHO Guidance, 2nd edn., Geneva, World Health Organization, 2004.

²⁴ Koblenz, G. D., 'Biosecurity in the Twenty-First Century: Emerging Biological Threats and Strategies for Governance', Nonproliferation Review, vol. 26, no. 5–6, 2019, pp. 445–461.

²⁵ Landrigan, P. J., R. Fuller, and N. J. A. Acosta, 'The Lancet Commission on Pollution and Health: Progress and New Frontiers', The Lancet Planetary Health, vol. 6, no. 5, 2022, pp. e442–e452.

навколишнє середовище високотоксичних сполук. Згорання вибухових речовин та пороху призводить до інгаляційного надходження в організм оксидів азоту, сірчаного ангідриду, чадного газу, а також дисперсних частинок важких металів, таких як свинець, кадмій, марганець і збіднений уран²⁶.

З позицій патофізіології, тривалий вплив цих ксенобіотиків викликає глибоку перебудову імунної відповіді:

1) пригнічення місцевого респіраторного імунітету: вдихання токсичних продуктів горіння та аерозолів важких металів спричиняє хімічний деструктивний бронхіт. Зазнають ушкодження клітини миготливого епітелію та різко знижується фагоцитарна активність альвеолярних макрофагів. Це повністю руйнує первинний бар'єр захисту дихальних шляхів, полегшуючи маніфестацію таких крапельних інфекцій, як туберкульоз чи пневмококова пневмонія²⁷.

2) дисфункція клітинної та гуморальної ланок: важкі метали та стійкі органічні забруднювачі (діоксини, фурани), що виділяються під час горіння військової техніки, мають виражену мієлотоксичну дію. Вони порушують процеси диференціації Т- і В-лімфоцитів у кістковому мозку та тимусі [23]. Спостерігається зміна імунорегуляторного індексу (співвідношення CD4+/CD8+) у бік супресії, а також зниження синтезу захисних імуноглобулінів класів IgG та IgA. Як наслідок, людина стає високосприйнятливою навіть до умовно-патогенних мікроорганізмів²⁸.

Медичні наслідки техногенного екоциду

Руйнування нафтобаз, хімічних підприємств та складів пестицидів зумовлює залпове забруднення поверхневих і ґрунтових вод бензолом, фенолами та фосфорорганічними сполуками. Вживання населенням води з таких джерел призводить до розвитку хронічної ендогенної інтоксикації²⁹.

Основним наслідком цього екологічного колапсу на рівні організму є деструкція кишкового бар'єра. Токсиканти викликають дисбіоз кишківника, знищуючи облигатну мікрофлору та пошкоджуючи щільні контакти між ентероцитами (синдром «дірявої кишки»). Зважаючи на те, що лімфоїдна тканина кишківника (пейєрові бляшки) формує понад 70 % імунокомпетентних клітин організму, такий локальний хімічний вплив призводить до системного дефіциту секреторного IgA. Це створює ідеальні умови для генералізації гострих кишкових інфекцій (холери, сальмонельозу) та полегшує проникнення бактеріальних ендотоксинів у системне русло, спричинюючи хронічне субклінічне запалення^{30, 31}.

Психонейроімунологічний аспект бойового стресу. Хронічний стрес, спричинений тривалим перебуванням у зоні бойових дій, загрозою життю та депривацією сну, активує гіпоталамо-гіпофізарно-наднирникову вісь. Постійна гіперсекреція кортизолу та катехоламінів діє як прямий імуносупресивний чинник. Глюокортикоїди блокують транскрипцію генів прозапальних цитокінів (IL-1, IL-6, TNF-alpha), пригнічують проліферацію Т-кілерів та НК-клітин.

Цей психонейроімуний зсув гальмує формування повноцінної імунної відповіді на вакцинацію та реактивацію латентних вірусних інфекцій (герпесвірусів, цитомегаловірусу), що на

²⁶ Lawrence, K., 'The Toxic Legacy of Warfare: Environmental Contamination and Immune Suppression', *Military Medicine and Environmental Health*, vol. 187, no. 3, 2023, pp. 112–120.

²⁷ Ratajczak, M. Z., and J. Ratajczak, 'Environmental Toxins, Heavy Metals, and the Immune System: Pathophysiological Mechanisms of Wartime Immunodeficiency', *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 25, no. 2, 2024, pp. 845–859.

²⁸ World Health Organization, *Compendium of WHO Guidance on Health and Environment in Armed Conflicts*, Geneva, World Health Organization, 2023.

²⁹ Dantzer, R., 'Neuroimmune Interactions in Wartime Stress and Chronic Immunosuppression', *Brain, Behavior, and Immunity*, vol. 110, 2023, pp. 45–53.

³⁰ Те саме [24].

³¹ Те саме [27].

тлі загального екологічного та хімічного виснаження середовища створює передумови для поліморфної патології воєнного часу³².

ВИСНОВКИ

1. Сучасні збройні конфлікти трансформують структуру біологічних загроз, перетворюючи епідемічний процес із контрольованого медико-соціального явища на багатофакторну асиметричну загрозу. Руйнування санітарно-гігієнічної інфраструктури, вимушена кумуляція населення в непристосованих укриттях та руйнування природних біотопів виступають синергічними детермінантами. Вони активують крапельний, водний та природно-осередковий механізми передачі інфекцій, повертаючи в епідемічний простір суворі антропонози (холеру, черевний тиф) і посилюючи поширення зоонозів (лептоспірозу, туляремії).

2. Розвиток синтетичної біології та технологій редагування геному (CRISPR) знецінює класичні системи біозахисту. Виникнення ризиків досліджень подвійного призначення забезпечує умови для створення штучних патогенів із заданими бойовими характеристиками: штучною стійкістю до антибіотиків, підвищеною вірулентністю та стійкістю до факторів зовнішнього середовища.

3. Верифіковано патогенетичний зв'язок між екологічним колапсом воєнного часу та зниженням імунного статусу популяції. Персистентна інтоксикація продуктами горіння вибухових речовин, важкими металами та ксенобіотиками спричинює глибокий імунодефіцит токсико-хімічної етіології. Він проявляється руйнуванням слизових оболонок дихальних шляхів і кишківника, а також супресією Т- і В-клітинних ланок імунітету, що критично підвищує сприйнятливості людини як до природних інфекцій, так і до можливих актів біотероризму.

Рекомендовані стратегії для медичної служби

Для мінімізації медико-біологічних наслідків війни та модернізації системи національної біобезпеки можна розглядати такі кроки:

- модернізація епідеміологічного нагляду – перехід від ретроспективної реєстрації інфекцій до проактивного синдромного моніторингу в режимі реального часу, що дозволяє виявляти аномальні спалахи на етапі первинного звернення пацієнтів³³;
- запровадження спільних протоколів моніторингу за станом довкілля, міграцією диких тварин та інфекційною захворюваністю людей між цивільними, військовими та ветеринарними службами захисту;
- оснащення референс-лабораторій та мобільних медичних комплексів системами геномного секвенування для швидкої ідентифікації штучних генетичних вставок і маркерів стійкості у виділених штамів патогенів;
- формування автономних запасів антибактеріальних препаратів резервного ряду, антитоксинів, засобів інтенсивної терапії та вакцин для екстреної профілактики критичних інфекцій у зонах бойових дій;
- обов'язкове включення курсу військової епідеміології, клінічної токсикології та критеріїв диференціальної діагностики деліберативного релізу патогенів до програм підготовки та підвищення кваліфікації військових і цивільних лікарів³⁴.

³² Те саме [28].

³³ Morse, S. S., and J. A. Pavlin, 'Syndromic Surveillance for Biological Threats and Emerging Infections in Conflict Zones', *Milbank Quarterly*, vol. 102, no. 1, 2024, pp. 88–104.

³⁴ World Health Organization, *Guidance for Medical Services on Health Security, Emergency Preparedness and Responses to Biological Threats*, Geneva, World Health Organization, 2025.

ВИСОКОРИЗИКОВІ ЛІКИ: ЇХ МІСЦЕ У ТАКТИЧНІЙ МЕДИЦИНІ: ІСТОРИЧНІ ТА СУЧАСНІ АСПЕКТИ

HIGH-RISK MEDICATIONS: THEIR PLACE IN TACTICAL MEDICINE: HISTORICAL AND MODERN ASPECTS

Заяць Марта Мирославівна, кандидат фармацевтичних наук, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, zayatsmarta@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6839-0207>

Заяць Зоряна Євстахівна, кандидат медичних наук, доцент, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, zzoriana1508@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2224-2257>

Корнійчук Ірина Юрївна, кандидат медичних наук, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ira.korniychuk11@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0438-1341>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.10>

Анотація. У роботі проаналізовано історичні підходи та сучасний стан фармакотерапії у системі Tactical Combat Casualty Care (TCCC). Розглянуто її застосування відповідно до рівневого доступу медичного персоналу та оцінки ризиків лікарських засобів. Проведено систематичний аналіз високоризикових ліків за класифікацією ISMP (Institute for Safe Medication Practices), що дозволяє інтегрувати фармакотерапію з безпекою пацієнта та умовами бойової допомоги. Показано, що стандартизоване та протокольне визначення застосування лікарських засобів мінімізує ризики ускладнень і підвищує ефективність догоспітальної допомоги у бойових умовах.

Ключові слова: тактична медицина, TCCC, фармакотерапія, високоризикові ліки, ISMP, MARCH, безпека життєдіяльності

Abstract. In the work was analysed historical approaches and the current state of pharmacotherapy within the Tactical Combat Casualty Care (TCCC) system. Its application is examined according to tiered personnel access and risk assessment of medications. A systematic analysis of high-alert drugs following the ISMP (Institute for Safe Medication Practices) classification enables the integration of pharmacotherapy with patient safety and combat care conditions. It is demonstrated that standardized and protocol-driven use of medications minimizes complications and enhances the effectiveness of prehospital care in combat environments.

Keywords: tactical medicine, TCCC, pharmacotherapy, high-alert drugs, ISMP, MARCH, life safety

ВСТУП

Тактична медицина є напрямом догоспітальної допомоги, що передбачає надання невідкладної допомоги пораненим в умовах бойових дій, підвищеної небезпеки, обмежених ресурсів і складної або відтермінованої евакуації. Її базовою протоковою основою є Tactical Combat Casualty Care (TCCC)¹, тобто система тактичної допомоги пораненим у бою, яка адаптує принципи догоспітальної травматологічної допомоги до реальних умов поля бою.

У науковій літературі TCCC розглядається як центральна концепція тактичної медицини та догоспітальної військово-польової допомоги, що була сформована з урахуванням специфіки

¹ TCCC — курс тактичної медицини: <https://tccc.org.ua/> Дата звернення: 01.05.2026.

бойової травми, небезпеки для того, хто надає допомогу, та необхідності поєднання медичних і тактичних рішень.

Однією з важливих складових тактичної медицини, поряд із застосуванням спеціальних медичних виробів — турнікетів, гемостатичних бинтів, компресійних бандажів, оклюзійних наліпок, шин та засобів профілактики гіпотермії, є раціональне використання лікарських засобів (фармакотерапія). Проте фармакотерапія в тактичних умовах має не універсальний, а чітко обмежений і рівневий характер. Обсяг застосування ліків залежить від того, хто саме надає допомогу: сам поранений або побратим, боєць-рятувальник, бойовий медик чи фахівець розширеної догоспітальної допомоги. Такий підхід зумовлений не другорядністю фармакотерапії, тобто раціонального застосування лікарських засобів, а необхідністю постійно співвідносити очікувану користь препарату з потенційними ризиками його неправильного використання.

Особливість тактичної медицини полягає в тому, що лікарські засоби можуть застосовуватися в умовах стресу, дефіциту часу, неповного огляду пораненого, відсутності лабораторного контролю, обмеженого моніторингу та небезпеки повторного ураження. Саме тому неправильно обраний лікарський засіб, помилка в дозуванні, нехтування протипоказаннями або неправильний шлях введення можуть не лише не покращити стан постраждалого, а й погіршити його. Це особливо стосується окремих категорій ліків, що часто застосовуються саме при невідкладних станах: опіоїдних анальгетиків, кетаміну, седативних і протисудомних засобів, транексамової кислоти, інфузійних розчинів, антибактеріальних засобів тощо.

У зв'язку з цим у тактичній медицині діє принцип рівневого допуску до фармакотерапії: чим нижчий рівень підготовки особи, яка надає допомогу, тим більш обмеженим має бути перелік дозволених лікарських засобів; чим вищий рівень підготовки, тим ширші можливості медикаментозного лікування, але тим вищі вимоги до медичної грамотності, клінічного мислення та здатності контролювати наслідки введення лікарських засобів.

Актуальність такого підходу підтверджується статистикою бойових втрат. За даними досліджень з тактичної медицини, близько 90% смертей у районах бойових дій настають ще до прибуття пораненого до медичного закладу². Це означає, що саме перші хвилини та години після поранення мають вирішальне значення для виживання. У таких умовах допомогу часто змушені надавати сам поранений, його побратим або військовослужбовець із базовою підготовкою, а не медик. Тому перелік ліків логічно на нижчих рівнях допомоги має бути максимально простим, безпечним і стандартизованим.

Додатково значення правильно організованої тактичної допомоги підтверджується історичною динамікою летальності. У дослідженнях, що охоплюють період з 1941 до 2005 року, зазначено зниження летальності серед військовослужбовців із 19,1% під час Другої світової війни до 15,8% під час війни у В'єтнамі та до 9,4% під час операцій Enduring Freedom і Iraqi Freedom³. Таке зниження пов'язується не лише з розвитком евакуації та хірургії, а й із покращенням підготовки особового складу, стандартизацією протоколів і вдосконаленням допомоги безпосередньо на передовій.

Особливо показовою є структура причин смерті на полі бою. За наведеними даними, основними причинами смерті є кровотеча — 91%, обструкція дихальних шляхів — 7,9% і напружений пневмоторакс — 1,1%. У структурі масивної кровотечі поранення кінцівок становлять

² Sarla, G. S. (2021). Tactical medicine. *Worldwide Medicine*, 2(4). <https://doi.org/10.5455/ww.111440>. Дата звернення: 10.05.2026.

³ Butler, F. K., Holcomb, J. B., Giebner, S. D., McSwain, N. E., & Bagian, J. (2007). Tactical combat casualty care 2007: Evolving concepts and battlefield experience. *Military Medicine*, 172(11 Suppl), 1–19.

13,5%, поранення перехідних анатомічних зон — 19,2%, а поранення тулуба — 67,3%⁴. Саме ці цифри пояснюють, чому алгоритм ТССС побудований за логікою MARCH, де першим елементом є контроль масивної кровотечі, а не медикаментозне лікування як таке.

Водночас лікарські засоби залишаються критично важливими на тих етапах, де їх застосування є обґрунтованим і безпечним. У сучасних підходах до медикаментозного забезпечення тактичної догоспітальної допомоги виділяють кілька ключових груп засобів: анальгетики та протизапальні засоби, зокрема мелоксикам, парацетамол, фентаніл і кетамін; гемостатичні засоби, зокрема транексамову кислоту; антибіотики широкого спектра дії, зокрема моксифлоксацин, левофлоксацин та ертапенем; інфузійні й протишокові засоби, а також препарати для стабілізації неврологічного стану.

Проблема полягає в тому, що ці лікарські засоби не можуть однаково використовуватися на всіх рівнях допомоги. Наприклад, на рівні самопомоги або взаємодопомоги доцільними є лише прості препарати з мінімальним ризиком помилки, переважно в пероральних формах. Натомість на рівні бойового медика або парамедика можуть застосовуватися ін'єкційні, трансмукозні, інтраназальні, внутрішньовенні чи внутрішньокісткові форми, які потребують значно кращої підготовки та контролю стану пораненого. Саме тому в сучасних дослідженнях підкреслюється потреба не лише в уніфікації аптек і медичних укладок, а й у впровадженні навчальних програм із фармакологічної грамотності для військовослужбовців різних рівнів підготовки.

Окремо актуальність рівневого підходу підтверджується досвідом антибіотикопрофілактики бойових ран. У джерелі, присвяченому антибіотикам у ТССС, наведено приклад бою в Могадішо 1993 року: 4 із 5 відкритих переломів великогомілкової кістки після вогнепальних поранень інфікувалися, обидва відкриті переломи стегнової кістки також були інфіковані, а загалом було зафіксовано 15 ранових інфекцій серед 58 поранених. У цьому ж джерелі зазначено, що затримка до остаточної медичної допомоги для більшості поранених у Могадішо становила 15 годин. Такі дані показують, що фармакотерапія на догоспітальному етапі може мати важливе значення, однак вона повинна бути простою, своєчасною, протокольно визначеною та адаптованою до умов евакуаційної затримки.

Отже, актуальність дослідження застосування лікарських засобів у тактичній медицині полягає не лише в необхідності забезпечити пораненого знеболенням, антибіотикопрофілактикою або протишоковою терапією. Вона полягає насамперед у потребі визначити, які саме ліки, на якому рівні допомоги, ким, у якій формі та за яких умов можуть застосовуватися безпечно й ефективно. Такий рівневий підхід дозволяє поєднати два ключові завдання тактичної медицини: своєчасне надання життєво необхідної допомоги та мінімізацію ризику медикаментозних помилок у бойових умовах.

МЕТОДОЛОГІЯ

Методологічну основу дослідження склали контент-аналіз, порівняльний аналіз, систематизації та наукового узагальнення джерел, присвячених застосуванню лікарських засобів у системі тактичної догоспітальної допомоги.

РЕЗУЛЬТАТИ

Результати аналізу джерел свідчать, що включення лікарських засобів до системи тактичної медицини відбувалося поступово і було пов'язане не з механічним перенесенням госпітальних

⁴ Eastridge, B. J., Mabry, R. L., Seguin, P., Cantrell, J., Tops, T., Uribe, P., ... Kotwal, R. S. (2012). Death on the battlefield (2001–2011): Implications for the future of combat casualty care. *The Journal of Trauma and Acute Care Surgery*. Цитовано в Puryear, B., Roarty, J., & Knight, C. (2022). EMS Tactical Combat Casualty Care. StatPearls. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK532260/>

підходів на поле бою, а з осмисленням реальних причин смерті та ускладнень у бойових умовах. Первинно тактична медицина формувалася як відповідь на потребу надання допомоги в небезпечному, нестабільному та ресурсно обмеженому середовищі, де поранений часто не може швидко потрапити до лікувального закладу. У джерелах зазначено, що ТССС виникла на початку 1990-х років як біомедичний дослідницький проєкт військово-морських сил спеціального призначення США, у 1996 році була вперше опублікована як додаток до *Military Medicine*, а у 2002 році була розглянута Комітетом з *Tactical Combat Casualty Care*⁵.

Історична логіка розвитку ТССС спочатку була зосереджена переважно не на фармакотерапії, а на швидких втручаннях, які могли бути виконані самим пораненим, побратимом або військовослужбовцем із базовою підготовкою. Це пояснюється тим, що в бойових умовах значна частина смертей настає ще до прибуття пораненого до медичного закладу. Близько 90% смертей у районах бойових дій відбуваються до досягнення закладу охорони здоров'я, що робить саме догоспітальний етап критичним для виживання. Саме тому першими ключовими елементами тактичної допомоги стали не лікарські засоби, а механічні втручання: накладання турнікета, тампонування, забезпечення прохідності дихальних шляхів, допомога при пораненнях грудної клітки, профілактика гіпотермії та організація евакуації. У фазі *Care Under Fire* основним втручанням визначається зупинка життєво небезпечної кровотечі та швидке накладання турнікета максимально високо, тоді як інші заходи відкладаються до переміщення пораненого в безпечніше місце.

Подальший розвиток тактичної медицини показав, що одних лише механічних засобів недостатньо для повноцінного ведення пораненого на догоспітальному етапі, особливо за умов тривалої евакуації. У тактичних умовах евакуація може тривати від кількох годин до кількох діб, а допомога часто починається безпосередньо в місці поранення через самодопомогу або взаємодопомогу. У цьому контексті лікарські засоби почали входити до протоколів як відповідь на конкретні проблеми: біль, ризик інфекційних ускладнень, наслідки крововтрати, шок, судоми, неврологічні порушення та потребу підтримати стан пораненого до наступного етапу медичної допомоги.

Особливо показовим прикладом історичного включення лікарських засобів до ТССС є антибіотикопрофілактика бойових ран. У джерелі, присвяченому антибіотикам у тактичній допомозі пораненим, зазначено, що потреба в ранньому застосуванні антибіотиків усвідомлювалася ще після Другої світової та Корейської воєн. Водночас навіть під час бою в Могадішо 1993 року антибіотики не застосовувалися американськими бойовими медиками. Наслідки були суттєвими: 4 із 5 відкритих переломів великогомілкової кістки після вогнепальних поранень інфікувалися, обидва відкриті переломи стегнової кістки також були інфіковані, а загалом зафіксовано 15 ранових інфекцій серед 58 поранених⁶.

Додатковим чинником, який сприяв перегляду ролі антибіотиків у тактичній медицині, стала тривала евакуаційна затримка. У тому ж джерелі зазначено, що для більшості поранених у Могадішо затримка до остаточної медичної допомоги становила близько 15 годин. Це суттєво відрізняє бойову догоспітальну допомогу від цивільної, де транспортування до лікарні зазвичай є швидшим. Саме ця відмінність стала одним із аргументів на користь включення антибіотиків до допомоги, яку можуть надавати бойові медики при проникаючих пораненнях живота,

⁵ Butler, F. K., Hagmann, J., & Butler, E. (1996). *Tactical Combat Casualty Care in Special Operations*. *Military Medicine*, 161(suppl_1), 3–16. https://doi.org/10.1093/milmed/161.suppl_1.3

⁶ *Tactical Combat Casualty Care*. (2023). Module 16: Antibiotics Administration. TCCC.org.ua. з <https://tccc.org.ua/en/guide/module-16-antibiotics-administration-cmc> Дата звернення: 01.05.2026.

масивному ушкодженні м'яких тканин, відкритих переломах, значному забрудненні ран або очікуваній затримці евакуації.

Водночас аналіз джерел показує, що лікарські засоби не включалися до тактичної медицини за принципом «чим більше препаратів, тим краще». Навпаки, їх відбір здійснювався з урахуванням бойових умов: простоти застосування, швидкості дії, зрозумілості дозування, стабільності в польових умовах, можливості транспортування, мінімізації побічних реакцій і відповідності рівню підготовки особи, яка надає допомогу. Наприклад, при обґрунтуванні вибору антибіотиків автори аналізували не лише спектр дії лікарських засобів, а й шлях введення, тривалість дії, потребу в розведенні, логістичну зручність, стабільність при різних температурах і можливість застосування у випадку тривалої евакуації⁷.

Отже, історичний розвиток тактичної медицини демонструє поступовий перехід від переважно механічних життєзберігальних втручань до обмеженої, протокольно визначеної та рівневої фармакотерапії. Лікарські засоби стали частиною тактичної допомоги лише тоді, коли було доведено їхню практичну доцільність у конкретних бойових ситуаціях: для знеболення, профілактики інфекцій, зменшення наслідків крововтрати, підтримки життєво важливих функцій і безпечнішої евакуації. У сучасних підходах до медикаментозного забезпечення тактичної догоспітальної допомоги до ключових груп препаратів відносять анальгетики, гемостатичні засоби, антибіотики широкого спектра, інфузійні та протишокові засоби, а також препарати для стабілізації неврологічного стану⁸.

Після публікації перших Tactical Combat Casualty Care (TCCC)-настанов у 1996 р., що включали основні медикаментозні рекомендації для догоспітальної допомоги на полі бою, наступним етапом розвитку TCCC стала їх систематична оновлювана робота Комітету з TCCC (CoTCCC). Ініціатива створення такого комітету була закладена наприкінці 1990-х років, коли USSOCOM Biomedical Initiatives Steering Committee (BISC) у 1998 р. поставив завдання щодо оновлення початкового документа, що призвело до утворення експертної групи для перегляду й розширення рекомендацій; ця група сформувала перший офіційний оновлений варіант TCCC близько 2003 р., який включав зміни до початкових фаз догляду за пораненими та уточнення медичних заходів у кожній фазі.⁹

Після публікації першого комплекту Tactical Combat Casualty Care (TCCC)-протоколів у 1996 р. як спеціального додатку журналу *Military Medicine*, наступним ключовим етапом розвитку стала систематична стандартизація й регулярне оновлення рекомендацій на основі бойового досвіду, наукових даних і зворотного зв'язку від практиків на місцях. Ініціатива створення Комітету тактичної допомоги пораненим у бою (Committee on Tactical Combat Casualty Care – CoTCCC) виникла на початку 2000-х років з метою забезпечити безперервний процес перегляду і вдосконалення TCCC-рекомендацій. Комітет був утворений у 2002 р. під егідою USSOCOM, а згодом отримав постійну організаційну підтримку та розширив тривалість свого функціонування в рамках спільної системи допомоги при травмі Joint Trauma System (JTS), що сприяло регулярним оновленням протоколів протягом наступних двох десятиліть.

⁷ Butler, F. K., & O'Connor, K. (2003). Antibiotics in tactical combat casualty care 2002. *Military Medicine*, 168(11), 911–914

⁸ Верховодова, Ю. В., Горова, А. Я., & Крохмаль, Г. Д. (2025). Рациональное использование лекарственных средств сил безопасности та оборони для надання догоспітальної допомоги. Актуальні питання клінічної фармакології та клінічної фармації: Матеріали науково-практичної Internet-конференції, 28 жовтня 2025, м. Харків, 200. Харків: НФаУ. Дата звернення: 01.05.2026.

⁹ Giebner, S. D. (2017). The transition to the Committee on Tactical Combat Casualty Care. *Wilderness & Environmental Medicine*, 28(2 Suppl), S18–S24. <https://doi.org/10.1016/j.wem.2016.11.005>

Перші оновлення протоколів від CoTCCC відбулися на початку 2000-х років, і вже у 2003 р. було переглянуто оригінальні настанови 1996 р. шляхом внесення змін до алгоритмів поведінки в кожній з фаз бойової допомоги, включно з уточненням заходів щодо оцінки стану пораненого та послідовності невідкладних втручань¹⁰.

Подальші редакції (наприклад, у 2007 р.) продовжили інтеграцію бойового досвіду Афганістану та Іраку, де практичні дані щодо причин уникнутих смертей та ускладнень сприяли уточненню тактичних і медичних алгоритмів у польових умовах¹¹.

Зміни в протоколах проводилися з урахуванням кількох джерел доказів: бойові звіти, наукові публікації, статистика причин смертності, лабораторні та практичні дослідження, а також експертні оцінки медичних і тактичних фахівців, що забезпечувало не лише реакцію на новий досвід, але й наукове обґрунтування рішень щодо включення чи обмеження певних втручань¹². У цьому контексті фармакотерапія в TCCC розвивалася не автономно, а як частина інтегрованих рекомендацій, адаптованих для кожної з фаз тактичної допомоги, де враховувалися можливості та ризики застосування препаратів в умовах обмеженої логістики, відсутності лабораторного контролю та під загрозою повторного ураження противником.

У сучасних протоколах TCCC лікарські засоби розподіляються за рівнями підготовки осіб, які надають допомогу, із урахуванням безпеки, ефективності та практичної доцільності у бойових умовах. Такий підхід дозволяє забезпечити оптимальне поєднання життєзберігальних втручань та фармакотерапії, мінімізуючи ризик помилок при використанні високоризикових препаратів.

ASM (self-aid/buddy aid) – базовий рівень передбачає використання лише простих і безпечних лікарських засобів, переважно пероральних: анальгетиків (парацетамол, мелоксикам) та антибіотиків широкого спектра дії (моксифлоксацин) у випадку відкритих поранень. На цьому рівні пріоритет віддається алгоритмізованій допомозі, яка не потребує спеціальної медичної освіти і забезпечує мінімізацію ризику ускладнень.

CLS (Combat Lifesaver, боєць рятувальник) – проміжний рівень передбачає обмежене протокольно визначене застосування лікарських засобів. До складу аптечки Combat Lifesaver включені анальгетики та антибіотики для догоспітальної профілактики інфекцій, що дозволяє забезпечити стабілізацію стану пораненого до прибуття бойового медика. На цьому рівні вже можливе обмежене використання препаратів для контролю болю та профілактики інфекцій за чіткими протоколами.

Бойовий медик – наступний рівень допомоги, що має доступ до більш широкого спектру лікарських засобів, включаючи ін'єкційні засоби. До них належать анальгетики високого ризику (кетамін, фентаніл), транексамова кислота для контролю масивної кровотечі та антибіотики для серйозних бойових ран. Медик цього рівня має необхідну підготовку для оцінки стану пораненого, вибору шляху введення та контролю побічних реакцій.

Парамедик – вищий рівень передбачає комплексну фармакотерапію критичних станів, включаючи інфузійні розчини, препарати крові, протисудомні засоби та седацію. Цей рівень дозволяє забезпечувати медичну підтримку протягом тривалої евакуації, контролювати побічні

¹⁰ Giebner, S. D. (2017). The transition to the Committee on Tactical Combat Casualty Care. *Wilderness & Environmental Medicine*, 28(2 Suppl), S18–S24. <https://doi.org/10.1016/j.wem.2016.11.005>

¹¹ Butler, F. K., Holcomb, J. B., Giebner, S. D., McSwain, N. E., & Bagian, J. (2007). Tactical combat casualty care 2007: Evolving concepts and battlefield experience. *Military Medicine*, 172(11 Suppl), 1–19. https://doi.org/10.7205/MILMED.172.Supplement_1.1

¹² Committee on Tactical Combat Casualty Care. (n.d.). Introduction to TCCC. Retrieved May 10, 2026, from <https://tccc.org.ua/en/guide/introduction-to-tccc>

ефекти та здійснювати моніторинг пацієнта, що робить фармакотерапію максимально ефективною і безпечною у бойових умовах.

Таким чином, розподіл лікарських засобів за рівнями допомоги в ТССС ґрунтується на принципі рівневої доступності, що забезпечує відповідність складності втручання та ризику застосування фармакотерапії рівню підготовки особового складу.

Систематизовану класифікацію за рівнями допомоги у тактичній медицині наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Систематизація лікарських засобів за рівнями надання догоспітальної допомоги відповідно до ТССС (2024)¹³¹⁴

Рівень допомоги	Лікарський засіб	Форма випуску	Дозування	Примітка (показання та особливості застосування)
Військовий набір таблеток для лікування ран (Combat Wound Medication Pack)				
ASM / базовий	Парацетамол	Таблетки	1000 мг	Для контролю помірного болю Початок/пік/тривалість дії: 20-45 хв/1-2 год/3-4 год
ASM / базовий	Мелоксикам	Таблетки	15 мг	Пацієнти з алергією на аспірин або інші нестероїдні протизапальні засоби не повинні використовувати мелоксикам Початок/пік/тривалість дії: 30-60 хв/5-6 год/20-24 год
ASM / базовий	Моксифлоксацин	Таблетки	400 мг	Лише за наявності відкритих ран і ризику інфекції
Обовязкова перевірка бійців підрозділу на наявність медикаментозної алергії!!!				
CLS / боєць-рятувальник	Парацетамол	Таблетки	1000 мг	Алгоритмізоване застосування
CLS / боєць-рятувальник	Мелоксикам	Таблетки	15 мг	Аспірин та інші НПЗП спричиняють дисфункцію тромбоцитів на декілька днів – НЕ використовуйте до/під час участі в бойових діях
CLS / боєць-рятувальник	Моксифлоксацин	Таблетки	400 мг	Пацієнтам з алергією на фторхінолони, пеніциліни або цефалоспорины можуть знадобитися альтернативні антибіотики, які повинні підбиратися медперсоналом підрозділу перед тим, як відправлятися на бойове завдання Розчин слід ввести ВМ протягом 1 години після приготування.
Бойовий медик	Кетамін	Ін'єкції (IV/IM)*	50-100 мг	Для сильного болю, високий ризик
Бойовий медик	Фентаніл	Ліофілізат для інтраназального або IV*	800 мкг	Контроль сильного болю ОТФЦ вводиться трансмукозним шляхом покладіть між щогою та яснами (трансбукально) Перша доза 800 мкг Друга доза – може бути введена через 15 хв, якщо біль не контролюється першою дозою

¹³ Комітет тактичної допомоги пораненим у бою. (2024). *Clinical guidelines for Tactical Combat Casualty Care (TCCC)*. URL: <https://tccc.org.ua/files/downloads/clinical-guidelines-2024-en.pdf> (Дата звернення: 01.05.2026).

¹⁴ Комітет тактичної допомоги пораненим у бою. (2024). *Clinical guidelines for Tactical Combat Casualty Care (TCCC)* (двомовна англо-українська версія). URL: <https://tccc.org.ua/files/downloads/clinical-guidelines-2024-en-ua.pdf> (Дата звернення: 02.05.2026).

Продовження таблиці 1

Рівень допомоги	Лікарський засіб	Форма випуску	Дозування	Примітка (показання та особливості застосування)
Обовязкова перевірка бійців підрозділу на наявність медикаментозної алергії!!!				
Бойовий медик	Транексамова кислота	Розчин для IV*	1 г за 10 хв, повторно 1 г/8 год	Контроль масивної кровотечі
Бойовий медик	Ертапенем	Порошок для ін'єкцій	1 г IV	Для серйозних бойових ран Слід розчинити лідокаїном: у флакон з 1 г ертапенему додати 3,2 мл 1% лідокаїну (без адреналіну).
Бойовий медик	Ондансетрон	Таблетки 4 мг	4 мг ондансетрону кожні 8 годин; повторити через 15 хвилин при стійких симптомах; приймати не більше 8 мг за 8 годин	Профілактика та лікування нудоти та блювання, пов'язаних із прийомом знеболювальних препаратів
Бойовий медик	Налоксон	розчин д/ін. 0.4 мг/мл	0,4-2 мг (ІН, ВМ, ВВ або ВК) Повторювати кожні 2-3 хвилини, доки симптоми не зникнуть, або ввести максимальну дозу 10 мг	Передозування опіоїдів Гіпотензія Пригнічення/порушення дихання Сильні зміни психічного стану або втрата свідомості
Парамедик	Інфузійні розчини (Ringer Lactate, NS)	Розчин для IV*	500–1000 мл	Шок, гіповолемія
Парамедик	Препарати крові (трансфузія)	Цільна кров, компоненти	За протоколом	Підтримка гемодинаміки
Парамедик	Мідазолам	Ін'єкції IV/ІМ*	2–5 мг	Протисудомний, седация
Парамедик	Фентаніл	IV*	25–50 мкг/доза	Контроль болю у критичних станах

*Примітка: IV (Intravenous) – внутрішньовенно, IM (Intramuscular) – внутрішньом'язово, IN (Intranasal) – інтраназально (через ніс), IO (Intraosseous) – внутрішньокістково

У контексті тактичної медицини важливо враховувати категорію high-alert medications, визначену ISMP (Institute for Safe Medication Practices). Оскільки саме цю класифікацію використовує ВООЗ. ISMP — це незалежна некомерційна організація, яка оцінює безпеку лікарських засобів і розробляє рекомендації щодо їх правильного використання з метою зменшення ризику медичних помилок і підвищення безпеки пацієнтів. Високоризикові ліки належать до категорії, при застосуванні яких помилка у дозуванні, шляху введення або контролі стану пацієнта може призвести до серйозних ускладнень або смерті¹⁵.

Високоризикові лікарські засоби у ТССС є невід'ємною складовою екстреної медичної допомоги на полі бою та частиною системи тактичної медицини, оскільки саме вони дозволяють контролювати критичні клінічні стани, такі як сильний біль, масивна кровотеча, судоми або загроза

¹⁵ Інститут безпечного застосування лікарських засобів (ISMP). (2024). Список лікарських засобів високого ризику у стаціонарних умовах (acute care settings) (09 січня 2024). URL: https://www.ismp.org/system/files/resources/2024-01/ISMP_HighAlert_AcuteCare_List_010924_MS5760.pdf (Дата звернення: 02.05.2026).

пригнічення дихання. Через високий потенційний ризик тяжких побічних ефектів ці засоби не допускаються до застосування на нижчих рівнях допомоги, де особи мають обмежену підготовку (ASM, CLS), і їх використання без відповідного контролю може призвести до значних ускладнень.

Систематизуємо високоризикові лікарські засоби, що є у протоколах ТССС з формою випуску, дозуванням, рівнем доступу та зазначенням ризику згідно з ISMP у таблиці 2.

Таблиця 2

Високоризикові ліки згідно з ISMP (2024) у тактичній медицині

Лікарський засіб	Форма випуску	Дозування	Рівень надання допомоги	Ризик (за ISMP, 2024 ¹⁶)	Примітка
Кетамін	Ін'єкції (IV/IM)*	50–100 мг	Бойовий медик	High-alert	Для сильного болю; високий ризик при некоректному введенні
Фентаніл	Ліофілізат IN/IV*	800 мкг	Бойовий медик	High-alert	Контроль сильного болю; можливе пригнічення дихання
Транексамова кислота (ТХА)	Розчин для IV*	1 г за 10 хв, повторно 1 г/8 год	Бойовий медик	High-alert	Контроль масивної кровотечі; ризик тромбозів при помилковому застосуванні
Ондансетрон	Таблетки / р-н для ін'єкції	4 мг кожні 8 год	Бойовий медик	High-alert	Профілактика нудоти та блювання; контроль побічних ефектів
Налоксон	Розчин для IV/IM/IN/IO*	0,4–2 мг, повторювати кожні 2–3 хв до 10 мг	Бойовий медик	High-alert	Передозування опіоїдів; ризик гіпотензії і пригнічення дихання
Інфузійні розчини (Ringer Lactate, NS)	Розчин для IV*	500–1000 мл	Парамедик	High-alert	Шок, гіповолемія; небезпека гіперволемії або електролітного дисбалансу
Препарати крові	Цільна кров, компоненти	За протоколом	Парамедик	High-alert	Підтримка гемодинаміки; ризик трансфузійних реакцій
Мідазолам	Ін'єкції IV/IM*	2–5 мг	Парамедик	High-alert	Протисудомний, седация; можливе пригнічення дихання
Фентаніл	Ін'єкції IV*	25–50 мкг/доза	Парамедик	High-alert	Контроль болю; високий ризик при передозуванні

*Примітка: IV (Intravenous) – внутрішньовенно, IM (Intramuscular) – внутрішньом'язово, IN (Intranasal) – інтраназально (через ніс), IO (Intraosseous) – внутрішньокістково

ОБГОВОРЕННЯ/ВИСНОВКИ

Аналіз сучасних протоколів ТССС показує, що лікарські засоби у тактичній медицині розподіляються за рівнями доступу залежно від підготовки персоналу та умов надання допомоги. На базовому рівні ASM і проміжному CLS дозволяється застосовувати лише пероральні препарати, такі як парацетамол, мелоксикам та антибіотики для відкритих ран. Це робиться свідомо, щоб мінімізувати ризики і забезпечити безпечне надання допомоги навіть при обмеженій підготовці.

¹⁶ Інститут безпечного застосування лікарських засобів (ISMP). (2024). Список лікарських засобів високого ризику у стаціонарних умовах (acute care settings) (09 січня 2024). URL: https://www.ismp.org/system/files/resources/2024-01/ISMP_HighAlert_AcuteCare_List_010924_MS5760.pdf (Дата звернення: 02.05.2026).

Історично фармакотерапія у ТССС розвивалася поступово. Перші настанови 1996 р. включали обмежений набір препаратів низького ризику — пероральні анальгетики та антибіотики і були орієнтовані на швидке забезпечення життєво важливих втручань на полі бою. На той час високоризикові препарати, такі як кетамін або фентаніл, ще не включалися до протоколів через високий ризик ускладнень при неконтрольованому застосуванні. Подальші оновлення протоколів (2003–2024 рр.) базувалися на досвіді Афганістану та Іраку, де бойові медики фіксували критичні клінічні ситуації, які потребували застосування сильних анальгетиків та протишокових препаратів. Це дозволило науково обґрунтувати включення високоризикових ліків на рівні бойового медика та парамедика, де їхнє застосування підпорядковується суворим протоколам та моніторингу.

Високоризикові препарати, такі як кетамін, фентаніл, транексамова кислота, ондансетрон, налоксон та інфузійні розчини, відносяться до категорії *high-alert medications*, визначеної ISMP, і доступні лише для персоналу з відповідною підготовкою. Їхнє неправильне застосування може викликати серйозні ускладнення, включно з пригніченням дихання, гіпотензією або передозуванням. Саме тому на нижчих рівнях допомоги вони заборонені.

Високоризикові ліки є важливою частиною екстреної допомоги і тактичної медицини. Вони дозволяють контролювати сильний біль, зупиняти кровотечу та підтримувати критичні життєві функції, де швидке і правильне втручання може врятувати життя. Їхнє застосування обмежене рівнем підготовки і суворими протоколами, що підкреслює принцип раціонального і безпечного використання лікарських засобів в бойових умовах.

Така організація фармакотерапії демонструє наукову новизну, оскільки вперше системно інтегрує високоризикові ліки з історичною еволюцією ТССС та сучасними доказами безпеки і ефективності.

АЗОТОФІКСУВАЛЬНІ МІКРООРГАНІЗМИ В УМОВАХ ХІМІЧНОЇ ЗАГРОЗИ: РЕАКЦІЯ *AZOTOBACTER* SP. НА ПЕСТИЦИДИ ТА ПРОТИПОЖЕЖНІ ПІНИ

NITROGEN-FIXING MICROORGANISMS UNDER CHEMICAL THREAT:
RESPONSE OF *AZOTOBACTER* SP. TO PESTICIDES AND FIREFIGHTING FOAMS

Звір Галина Іванівна, канд. біол. наук, доцент, Львівський національний університет імені Івана Франка, galynazvir@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9047-4418>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.11>

Анотація. У розділі наведено результати дослідження впливу пестицидів (гербіциду Раундапу, фунгіциду Квадрісу, інсектициду Антигусін) та протипожежних плівкоутворювальних піноутворювачів типу AFFF на бактерії роду *Azotobacter*. Актуальність роботи зумовлена зростанням антропогенного навантаження на ґрунтові екосистеми, масштабним застосуванням засобів захисту рослин та збільшенням хімічного забруднення довкілля внаслідок воєнних дій на території України. Чутливість бактерій до дії ксенобіотиків досліджували диско-дифузійним методом, використовуючи паперові диски, імпрегновані різними концентраціями препарату. З метою дослідження впливу пестицидів і протипожежних пін на нагромадження біомаси та утворення іонів амонію, бактерії роду *Azotobacter* вирощували в середовищі Ешбі упродовж 2–3 діб за температури 28 °C та аеробних умов. Досліджуваний препарат додавали в середовище в концентраціях, рекомендованих до використання та вдвічі вищих. З метою перевірки здатності азотофіксувальних бактерій використовувати плівкоутворювальний піноутворювач як джерело карбону, їх вирощували у середовищі Раймонда, в яке вносили піноутворювач як єдине джерело карбону та енергії. Встановлено, що нагромадження біомаси та процес діазототрофії у бактерій роду *Azotobacter* залежать від хімічної природи та концентрації діючої речовини. Токсичний ефект забруднювачів може бути спричинений також допоміжними речовинами у складі препарату. Отримані результати свідчать про адаптаційний потенціал бактерій роду *Azotobacter* в умовах хімічного забруднення та можливість застосування їх з метою біомоніторингу та біоремедіації забруднених ґрунтів. Наголошено на необхідності контролю застосування пестицидів і протипожежних засобів з метою мінімізації їх негативного впливу на мікроорганізми ґрунту, що беруть участь у колообігу нітрогену.

Ключові слова: мікробіоценоз ґрунту, азотофіксувальні бактерії, *Azotobacter* sp., пестициди, водний плівкоутворювальний піноутворювач типу AFFF.

Abstract. This section presents the results of a study on the effects of pesticides (the herbicide Roundup, the fungicide Quadris, and the insecticide Antigusin) and aqueous film-forming foams (AFFF) on bacteria of the genus *Azotobacter*. The relevance of this work is associated with increasing anthropogenic pressure on soil ecosystems, the widespread use of plant protection products, and the growing chemical contamination of the environment resulting from military activities in Ukraine. The sensitivity of bacteria to xenobiotics was investigated using the disk diffusion method with paper disks impregnated with different concentrations of the tested compounds. To evaluate the effects of pesticides

and firefighting foams on biomass accumulation and ammonium ion production, *Azotobacter* spp. were cultivated in Ashby medium for 2–3 days under aerobic conditions at 28 °C. The tested compounds were added to the medium at recommended and twofold higher concentrations. To assess the ability of nitrogen-fixing bacteria to utilize AFFF foaming agents as a carbon source, the microorganisms were cultivated in Raymond medium supplemented with the foaming agent as the sole source of carbon and energy. It was established that biomass accumulation and diazotrophic activity in *Azotobacter* bacteria depend on the chemical nature and concentration of the active ingredients. The toxic effects of the pollutants may also be associated with auxiliary components present in the formulations. The obtained results indicate the adaptive potential of *Azotobacter* spp. under chemically contaminated conditions and confirm their potential application in the biomonitoring and bioremediation of polluted soils. Particular emphasis is placed on the necessity of controlling the use of pesticides and firefighting agents in order to minimize their adverse effects on soil microorganisms involved in the nitrogen cycle.

Keywords: soil microocenosis, nitrogen-fixing bacteria, *Azotobacter* sp., pesticides, film forming foam (AFFF).

ВСТУП

Сучасне антропогенне навантаження на довкілля є одним із ключових чинників деградації ґрунтових екосистем та порушення глобальних біогеохімічних циклів. Значну екологічну небезпеку становить інтенсивне застосування пестицидів у сільському господарстві, що супроводжується накопиченням у ґрунтах гербіцидів, фунгіцидів, інсектицидів та продуктів їхньої трансформації. Багато з цих сполук характеризуються токсичністю щодо ґрунтової мікробіоти, здатністю до тривалого збереження у навколишньому середовищі та негативним впливом на процеси біологічної фіксації азоту, мінералізації органічної речовини й підтримання родючості ґрунтів^{1,2}. Особливого значення ця проблема набуває в умовах сучасних воєнних дій на території України, які супроводжуються масштабним хімічним забрудненням довкілля внаслідок вибухів, пожеж, руйнування промислових та інфраструктурних об'єктів, а також широкого використання протипожежних засобів.

Ще одним небезпечним джерелом стійкого хімічного забруднення є протипожежні піни, зокрема плівкоутворювальні піни типу AFFF (aqueous film-forming foam), до складу яких входять пер- і поліфторалкільні речовини (PFAS). Ці сполуки характеризуються надзвичайною стабільністю завдяки високій енергії зв'язку C–F, що зумовлює їхню персистентність, мобільність у ґрунтово-водному середовищі та здатність до біоаккумуляції³. Відомо, що PFAS можуть змінювати структуру ґрунтових мікробних угруповань, пригнічувати активність ферментів циклу нітрогену, впливати на нітрифікацію, денітрифікацію та функціонування азотофіксувальних мікроорганізмів⁴. Дослідження останніх років свідчать, що компоненти AFFF здатні індукувати оксидативний стрес, порушувати проникність клітинних мембран та змінювати метаболічну активність ґрунтових

¹ A Sumbul, RA Ansari, R Rizvi and I Mahmood, 'Azotobacter: A Potential Bio-fertilizer for Soil and Plant Health Management' (2020) 27(12) *Saudi Journal of Biological Sciences* 3634–3640 <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.004>.

² A Aasfar, A Bargaz, K Yaakoubi, A Hilali, I Bennis, Y Zeroual and IM Kadmiri, 'Nitrogen Fixing *Azotobacter* Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability' (2021) 12 *Frontiers in Microbiology* 628379 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>.

³ F Li, Y Duan, Y Li and others, 'A Review of Microbial Degradation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS): Biotransformation Routes and Enzymes' (2023) 859 *Science of the Total Environment* 160010 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160010>.

⁴ Y Wang, R Zhang, J Li and others, 'Fluoroalkylether Compounds Affect Microbial Community Structures and Abundance of Nitrogen Cycle-Related Genes in Soil-Microbe-Plant Systems' (2021) 215 *Ecotoxicology and Environmental Safety* 113033 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113033>.

бактерій⁵. Особливо небезпечними вважають довголанцюгові PFAS, які характеризуються високою токсичністю та винятковою стійкістю до природної деградації.

У зв'язку з цим дедалі більшої актуальності набувають біотехнологічні підходи до ремедіації забруднених екосистем із використанням мікроорганізмів-біодеструкторів ксенобіотиків. Ґрунтові бактерії відіграють визначальну роль у трансформації токсичних органічних сполук, забезпечуючи їх часткову або повну деградацію шляхом ферментативного гідролізу, окиснення, відновлення та кометаболічних процесів. Особливий інтерес у цьому контексті становлять бактерії роду *Azotobacter* – вільноживучі аеробні діазотрофи, які є важливими компонентами ґрунтових мікробіоценозів та беруть участь у підтриманні азотного балансу екосистем. Завдяки здатності до фіксації молекулярного азоту, синтезу фітогормонів, вітамінів і інших біологічно активних речовин, а також утворенню екзополісахаридів і цист, *Azotobacter* sp. сприяють покращенню родючості ґрунтів, стимулюють ріст рослин і підвищують їхню стійкість до абіотичних стресів, зокрема посухи, засолення та токсичного впливу забруднювачів². Представники цього роду здатні трансформувати або частково розкладати окремі пестициди, ароматичні вуглеводні та інші ксенобіотики, знижуючи їхню токсичність у ґрунтовому середовищі. Крім того, бактерії *Azotobacter* sp. беруть участь у метаболізмі важких металів шляхом біосорбції, біоаккумуляції та зміни їхньої рухомості й біодоступності завдяки продукції екзополісахаридів та органічних кислот. Це сприяє зменшенню токсичного навантаження на рослини й ґрунтову мікробіоту та створює передумови для відновлення деградованих і техногенно забруднених ґрунтів.

Метою цієї роботи є з'ясування особливостей функціонування азотофіксувальних мікроорганізмів роду *Azotobacter* в умовах хімічної загрози, зумовленої впливом пестицидів і протипожежних плівкоутворювальних пін типу AFFF, у контексті їхньої ролі в ґрунтових екосистемах.

У роботі наведено результати експериментальних досліджень впливу пестицидів (гербіциду Раундапу, фунгіциду Квадрісу, інсектициду Антигусін), протипожежних плівкоутворювальних пін типу AFFF, з урахуванням їхніх фізико-хімічних характеристик і біологічної активності, на бактерії роду *Azotobacter*. Отримані результати розширюють сучасні уявлення про адаптаційний потенціал *Azotobacter* sp. в умовах хімічного забруднення та можуть бути використані для розроблення підходів до біомоніторингу й біоремедіації забруднених ґрунтів.

1. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У роботі використовували бактерії *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272, які зберігаються в колекції культур мікроорганізмів кафедри мікробіології ЛНУ імені Івана Франка, та бактерії *Azotobacter chroococcum* А1, виділені з біопрепарату «Азотофіт». Для культивування азотофіксувальних бактерій роду *Azotobacter* використовували середовище Ешбі⁶. Колонії мікроорганізмів, які вирости на середовищі Ешбі, пересівали на щільне селективне середовище для *Azotobacter chroococcum* такого складу (г/л): глюкоза – 20,0; K₂HPO₄ – 0,8; CaCO₃ – 20,0; FeCl₃×6 H₂O – 0,1; Na₂MoO₄×2H₂O – 0,005; агар – 20,0; вода дистильована – 1л. Після отримання чистих культур проводили морфологічну ідентифікацію та досліджували біохімічні властивості бактерій з метою підтвердження їхньої належності до роду *Azotobacter*.

⁵ X Zhang, Z Chen, S Wang and others, 'Global Distribution of PFAS and Their Impacts on Microbial Greenhouse Gas Emission and Mechanisms' (2026) 393 *Environmental Pollution* 127714 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2026.127714>.

⁶ SP Gudz, SO Hnatysh, HV Yavorska, IS Bilinska and BM Borsukevych, *Praktykum z mikrobiologii* [Workshop on Microbiology] (Lviv Ivan Franko National University Publishing Center 2014) 436.

З метою дослідження впливу пестицидів на бактерії *A. chroococcum* ВКМ В-1272 та *A. chroococcum* А1 їх вирощували в серії пробірок, вносячи досліджувані сполуки у концентраціях, рекомендованих до застосування та вдвічі вищих: гербіцид Раундап – 8,0 та 16,0 мл/л; інсектицид Антигусін – 1,0 та 2,0 мл/л; фунгіцид Квадріс – 1,2 та 2,4 мл/л. Вихідна біомаса становила 0,05 г/л. Культивували пробірки протягом 2–3 діб за температури 28°C за аеробних умов. У процесі культивування періодично вимірювали біомасу культури, яку визначали за мутністю розведеної суспензії клітин фотометруванням на фотоелектроколометрі КФК-3 (довжина хвилі 390 нм, оптичний шлях 3 мм) і розраховували за формулою: $C \text{ (г/л)} = E_{390} \times n / K$, де E_{390} – екстинкція за довжини хвилі 390 нм; n – розведення, разів; K – коефіцієнт перерахунку, отриманий за калібрувальною кривою залежності екстинкції від сухої маси клітин (для *A. chroococcum* ВКМ В-1272 $K = 0,77 \pm 0,08$, для *A. chroococcum* А1 $K = 0,81 \pm 0,09$).

Для оцінювання чутливості азотофіксувальних бактерій до пестицидів та плівкоутворювальних піноутворювачів використовували диско-дифузійний метод, насичуючи паперові диски розчинами тестованих сполук. Для цього готували робочі розчини з концентрату піноутворювачів в концентраціях, рекомендованих для застосування (3 % та 6 %), а також у підвищених концентраціях – 10 %, 15 % і 20 %. Пестициди досліджували у концентраціях, рекомендованих виробником, вдвічі нижчих та вдвічі вищих дозах. Стерильні паперові диски імпрегнували отриманими розчинами. Розплавлене живильне середовище (м'ясо-пептонний агар, МПА) розливали в чашки Петрі, наносили дві-три краплі суспензії бактерій, які розтирали стерильним шпателем по поверхні середовища (посів газonom). Диски, насичені різними концентраціями пестицидів / піноутворювачів поміщали на чашку з МПА за допомогою профламованого пінцета. Чашки культивували в термостаті за температури 28 °C. Чутливість азотофіксувальних бактерій до дії піноутворювачів та пестицидів оцінювали за утворенням зони затримки росту культури навколо дисків.

З метою перевірки здатності бактерій *A. chroococcum* ВКМ В-1272 використовувати плівкоутворювальний піноутворювач як джерело карбону, використовували середовище Раймонда такого складу (г/л): Na_2CO_3 – 0,1; $\text{MgSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$ – 0,2; $\text{FeSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$ – 0,02; CaCl_2 – 0,01; $\text{MnSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$ – 0,02; $\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3 \text{ H}_2\text{O}$ – 1,0; $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \times 3 \text{ H}_2\text{O}$ – 1,5; NH_4Cl – 3; вода дистильована – 1 л. Як єдине джерело карбону та енергії у середовище вносили піноутворювач у кількості 0,1 % за об'ємом.

Концентрацію іонів амонію вимірювали потенціометричним іон-селективним методом. Концентрацію фторид-іонів у рідкому середовищі у разі розкладання бактеріями флуорсинтетичного плівкоутворювального піноутворювача визначали потенціометричним методом з використанням іон-селективного кристалічного електрода.

Усі дослідження виконували у трьох повторах. Статистичну обробку результатів проводили за допомогою програм Microsoft Excel 2003, Origin Pro 7,0. Вираховували основні статистичні показники за безпосередніми даними (середнє арифметичне – M ; стандартна похибка середнього арифметичного – m).

2. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

2.1. Біологічні властивості бактерій роду *Azotobacter*

Бактерії роду *Azotobacter* є одними з найвідоміших представників азотофіксувальних мікроорганізмів, які відіграють важливу роль у колообігу нітрогену та підвищенні родючості ґрунтів. Вони широко розповсюджені у нейтральних і слаболужних ґрунтах, часто входять до

складу ризосферної мікробіоти рослин, що колонізують кореневу зону і беруть участь у трансформації атмосферного азоту в доступні для рослин форми^{7,8}.

Рід *Azotobacter* належить до відділу Pseudomonadota, класу Gammaproteobacteria, порядку Pseudomonadales, родини Pseudomonadaceae. За даними сучасних таксономічних баз (NCBI Taxonomy, LPSN, GBIF), рід є відносно невеликим, але таксономічно динамічним через перегляд філогенетичних зв'язків на основі аналізу 16S rRNA та повногеномних даних. За даними актуальних оновлень таксономічних баз (2023–2025 pp.), до роду *Azotobacter* входять приблизно 6–8 видів, хоча їхня кількість може змінюватися залежно від критеріїв класифікації та включення нових ізолятів^{9,10}. Найбільш вивченим видом є *A. vinelandii*, який використовують як модельний організм для дослідження механізмів біологічної азотофіксації, енергетичного метаболізму та регуляції експресії генів, пов'язаних із нітрогеназним комплексом¹¹.

Бактерії роду *Azotobacter* – Грам-негативні мезофільні облигатно аеробні хемоорганотрофні мікроорганізми. Джерелом енергії та карбону для них є різноманітні органічні сполуки – вуглеводи, спирти, органічні кислоти¹². Клітини *Azotobacter* sp. є відносно великими серед ґрунтових бактерій (приблизно 1–2 мкм у діаметрі), мають виражений поліморфізм. Вони можуть набувати овальної, кулястої або паличкоподібної форми залежно від умов культивування та віку культури¹³. Під час мікроскопування клітини розташовуються поодинокі, попарно, у вигляді нерегулярних агрегацій або, зрідка, ланцюжків різної довжини. У молодих культурах клітини зазвичай рухливі завдяки перитрихіальним джгутикам. У міру старіння культури рухливість знижується, клітини стають більш округлими та починають продукувати слизовий екзополімерний шар, який формує капсулу, що виконує захисну функцію¹⁴.

Характерною морфологічною ознакою бактерій роду *Azotobacter* є здатність до утворення цист – спеціалізованих спочиваючих форм із товстою багатошаровою оболонкою. Цисти забезпечують стійкість до висихання, коливань температури, ультрафіолетового та гамма-випромінювання, сонячної радіації, дії ультразвуку тощо. Після відновлення сприятливих умов (значення кислотності, температури і наявності доступного джерела карбону) відбувається екцистування клітин і перехід у вегетативний стан. Важливо, що азотобактер не утворює спор, на відміну від деяких інших ґрунтових бактерій¹⁵.

Для видів роду *Azotobacter* характерна висока метаболічна пластичність, яка додатково підсилює екологічну конкурентоспроможність, та здатність до інтенсивної біологічної фіксації

⁷ A Sumbul, RA Ansari, R Rizvi and I Mahmood, 'Azotobacter: A Potential Bio-fertilizer for Soil and Plant Health Management' (2020) 27(12) *Saudi Journal of Biological Sciences* 3634–3640 <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.004>.

⁸ A Aasfar, A Bargaz, K Yaakoubi, A Hilali, I Bennis, Y Zeroual and IM Kadmiri, 'Nitrogen Fixing Azotobacter Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability' (2021) 12 *Frontiers in Microbiology* 628379 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>.

⁹ List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature, <https://lpsn.dsmz.de/> (accessed 22 May 2026).

¹⁰ National Center for Biotechnology Information (NCBI), Taxonomy Browser: Azotobacter (id=352), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy/Browser/wwwtax.cgi?id=352> (accessed 22 May 2026).

¹¹ JS Martín del Campo, J Rigsbee, MB Batista, F Mus, LM Rubio, O Einsle, JW Peters, R Dixon, DR Dean and PC Dos Santos, 'Overview of Physiological, Biochemical, and Regulatory Aspects of Nitrogen Fixation in Azotobacter vinelandii' (2023) 57(5–6) *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology* 492–538 <https://doi.org/10.1080/10409238.2023.2181309>.

¹² A Sumbul, RA Ansari, R Rizvi and I Mahmood, 'Azotobacter: A Potential Bio-fertilizer for Soil and Plant Health Management' (2020) 27(12) *Saudi Journal of Biological Sciences* 3634–3640 <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.004>.

¹³ A Sumbul, RA Ansari, R Rizvi and I Mahmood, 'Azotobacter: A Potential Bio-fertilizer for Soil and Plant Health Management' (2020) 27(12) *Saudi Journal of Biological Sciences* 3634–3640 <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.004>.

¹⁴ J Wünsche and J Schmid, 'Acetobacteraceae as Exopolysaccharide Producers: Current State of Knowledge and Further Perspectives' (2023) 11 *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 1166618 <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1166618>.

¹⁵ A Sumbul, RA Ansari, R Rizvi and I Mahmood, 'Azotobacter: A Potential Bio-fertilizer for Soil and Plant Health Management' (2020) 27(12) *Saudi Journal of Biological Sciences* 3634–3640 <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.004>.

атмосферного азоту. Здатність до діазотрофії за допомогою нітрогеназного ферментного комплексу є ключовою фізіологічною властивістю представників роду *Azotobacter*. Біологічна фіксація азоту є енергозалежним процесом, що здійснюється за участі нітрогенази та полягає у відновленні молекулярного азоту (N_2) до амоніаку (NH_3). У водному середовищі амоніак частково протонується з утворенням іонів амонію (NH_4^+), які використовуються в біосинтезі клітинних сполук¹¹. Ключову роль у функціонуванні нітрогеназного комплексу відіграють мікроелементи, насамперед молібден, який входить до складу FeMo-кофактора активного центру нітрогенази – ключового ферменту процесу діазотрофії. Цей фермент є високочутливим до кисню, оскільки O_2 призводить до інактивації його метало-сіркових кофакторів. У разі дефіциту молібдену у клітинах бактерій *Azotobacter* sp. може індукуватися синтез альтернативних варіантів нітрогеназного комплексу, зокрема ванадій- та ферумзалежної нітрогенази².

Представники роду *Azotobacter* демонструють широкий спектр фізіолого-біохімічних адаптацій, які забезпечують існування за різних екологічних умов та визначають їхню роль у колообігу нітрогену. За наявності в середовищі нітратів, іонів амонію або амінокислот бактерії роду *Azotobacter* можуть використовувати їх як джерела нітрогену, що супроводжується пригніченням активності нітрогеназного комплексу. У разі дефіциту мінеральних форм азоту основним метаболічним процесом стає біологічна фіксація азоту. Ефективність цього процесу є варіабельною і залежить від штаму та умов культивування; для високоефективних штамів вона може становити приблизно 8–12 мг зв'язаного азоту на 1 г спожитої глюкози, що підтверджується експериментальними та модельними дослідженнями¹⁶.

Особливістю роду *Azotobacter* є унікальна стратегія забезпечення функціонування чутливої до кисню нітрогенази в умовах облігатно аеробного метаболізму. Це досягається завдяки так званому механізму “respiratory protection”. Його суть полягає в значному підвищенні інтенсивності дихання, внаслідок чого клітини ефективно споживають кисень і підтримують його низьку концентрацію поблизу чутливих внутрішньоклітинних структур. При цьому електронтранспортний ланцюг функціонує переважно в режимі високої швидкості перенесення електронів до термінальних оксидаз, що зменшує внутрішньоклітинне кисневе навантаження. Додатково цьому процесу сприяють утворення слизових екзополісахаридів і формування цист, які виконують захисну та регуляторну функції. Такі адаптації дозволяють представникам роду *Azotobacter* поєднувати аеробне дихання з функціонуванням чутливої до кисню азотофіксувальної системи, що є однією з ключових фізіологічних особливостей цих бактерій¹⁷.

Оптимальні умови росту та фіксування атмосферного азоту для більшості представників роду *Azotobacter* спостерігаються за нейтральних та слаболужних значень рН, зазвичай у межах 7,0–7,5. Водночас клітини здатні зберігати життєздатність і рости в широкому діапазоні кислотності — від 4,8 до 8,5, проте відхилення від оптимуму призводить до зниження інтенсивності метаболічних процесів і пригнічення активності нітрогеназного комплексу. Така толерантність до змін рН свідчить про високу екологічну пластичність роду та його здатність адаптуватися до різних ґрунтових умов.

2.2. Вплив бактерій роду *Azotobacter* на ріст і розвиток рослин

Бактерії роду *Azotobacter* є типовими представниками вільноживучих ґрунтових бактерій, що стимулюють ріст рослин і відіграють важливу роль у підтриманні родючості ґрунтів та підвищенні

¹⁶ MH Plunkett, JL Knopp, AM Barney and others, ‘Key Factors Affecting Ammonium Production by an *Azotobacter vinelandii* Strain Deregulated for Biological Nitrogen Fixation’ (2020) 19 *Microbial Cell Factories* 107 <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01362-9>.

¹⁷ A Sumbul, RA Ansari, R Rizvi and I Mahmood, ‘*Azotobacter*: A Potential Bio-fertilizer for Soil and Plant Health Management’ (2020) 27(12) *Saudi Journal of Biological Sciences* 3634–3640 <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.004>.

продуктивності агроєкосистем. Сучасні дослідження підтверджують, що представники цього роду поєднують кілька механізмів позитивного впливу на рослини, серед яких провідними є біологічна фіксація атмосферного азоту, синтез фітогормонів, утворення сидерофорів та підвищення стійкості рослин до абіотичних стресів^{18,19}.

Здатність бактерій роду *Azotobacter* до діазотрофії забезпечує природне збагачення ґрунту сполуками нітрогену, зменшуючи залежність рослин від мінеральних добрив. Найбільш ефективними азотофіксувальними видами є *Azotobacter vinelandii* та *A. chroococcum*, які демонструють високу активність нітрогенази в ризосферних умовах. Зокрема, *A. vinelandii* DJ та *A. vinelandii* OP зазвичай використовують як модельні в біохімічних і молекулярних дослідженнях, тоді як численні ґрунтові ізоляти *A. chroococcum* широко застосовують в агробіотехнології як основу біодобрив²⁰.

Окрім азотофіксації, важливою рисою *Azotobacter* sp. є здатність синтезувати широкий спектр біологічно активних речовин. Багато штамів продукують індол-3-оцтову кислоту (ІАА), яка належить до ауксинів і стимулює розвиток кореневої системи, збільшуючи площу поглинання поживних речовин. Також описано синтез гібереліноподібних сполук, які сприяють проростанню насіння та росту пагонів. Ці ефекти найбільш виражені у штамів *A. chroococcum* і *A. vinelandii*, виділених із ризосфери зернових культур та бобових рослин^{21,22}.

Ще одним важливим механізмом впливу *Azotobacter* spp. на ріст рослин є синтез сидерофорів – низькомолекулярних сполук, що зв'язують іони феруму та підвищують його доступність для рослин. Це особливо важливо у ґрунтах із низькою біодоступністю Fe^{3+} ^{23,24}. У представників роду *Azotobacter*, зокрема *A. vinelandii*, сидерофори відіграють важливу роль у забезпеченні клітин залізом, необхідним для функціонування ферменту нітрогенази та процесу фіксації атмосферного азоту. Найбільш дослідженим сидерофором азотобактера є азотобактин – флуоресцентна сполука, подібна до піовердинів роду *Pseudomonas*. Вона утворюється за умов нестачі Fe^{3+} та характеризується високою спорідненістю до іонів феруму^{25,26}. Азотобактин має складну хімічну структуру, до складу якої входять катехольні, гідроксаматні та гідроксикарбоксильні функціональні групи, що забезпечують ефективне хелатування металів. Дослідження показали, що ця молекула здатна утворювати стабільні комплекси не лише з Fe^{3+} , а й з молібдатом і ванадатом, які необхідні для синтезу металовмісних кофакторів нітрогенази²⁷. Окрім азотобактину, в *A. vinelandii* описані

¹⁸ A Sumbul, RA Ansari, R Rizvi and I Mahmood, 'Azotobacter: A Potential Bio-fertilizer for Soil and Plant Health Management' (2020) 27(12) *Saudi Journal of Biological Sciences* 3634–3640 <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.004>.

¹⁹ A Aasfar, A Bargaz, K Yaakoubi, A Hilali, I Bennis, Y Zeroual and IM Kadmiri, 'Nitrogen Fixing Azotobacter Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability' (2021) 12 *Frontiers in Microbiology* 628379 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>.

²⁰ A Aasfar, A Bargaz, K Yaakoubi, A Hilali, I Bennis, Y Zeroual and IM Kadmiri, 'Nitrogen Fixing Azotobacter Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability' (2021) 12 *Frontiers in Microbiology* 628379 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>.

²¹ A Sumbul, RA Ansari, R Rizvi and I Mahmood, 'Azotobacter: A Potential Bio-fertilizer for Soil and Plant Health Management' (2020) 27(12) *Saudi Journal of Biological Sciences* 3634–3640 <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.004>.

²² MS Khan, A Zaidi and J Musarrat, 'Microbial Strategies for Plant Growth Promotion and Improved Crop Productivity' (2019) 9(8) *Agronomy* 1–20 <https://doi.org/10.3390/agronomy9080439>.

²³ J Kramer, Ö Özkaya and R Kümmerli, 'Bacterial Siderophores in Community and Host Interactions' (2020) 18(3) *Nature Reviews Microbiology* 152–163 <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0284-4>.

²⁴ M Saha, S Sarkar, B Sarkar, BK Sharma, S Bhattacharjee and P Tribedi, 'Microbial Siderophores and Their Potential Applications: A Review' (2016) 23 *Environmental Science and Pollution Research* 3984–3999 <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4294-0>.

²⁵ 'Iron Homeostasis in *Azotobacter vinelandii*' (2023) 12(11) *Biology* 1423.

²⁶ M Sandy and A Butler, 'Microbial Iron Acquisition: Marine and Terrestrial Siderophores' (2009) 109(10) *Chemical Reviews* 4580–4595 <https://doi.org/10.1021/cr9002787>.

²⁷ AML Kraepiel, J-P Bellenger, T Wichard and FMM Morel, 'Role of the Siderophore Azotobactin in the Bacterial Acquisition of Nitrogenase Metal Cofactors' (2009) 43(19) *Environmental Science & Technology* 7218–7224 <https://doi.org/10.1021/es8037214>.

також інші сидерофори — азотохелін та амінохелін. Амінохелін є катехоламіновим сидерофором, який зв'язує Fe^{3+} та сприяє його транспорту в бактеріальну клітину. Його синтез активується в умовах дефіциту заліза та координується разом із синтезом інших катехольних сидерофорів²⁸. Таким чином, сидерофори бактерій роду *Azotobacter* беруть участь не тільки у транспорті заліза, а й у забезпеченні клітини іншими важливими мікроелементами.

Сидерофори забезпечують конкурентні переваги *Azotobacter* sp. у ґрунті, оскільки дають змогу ефективно засвоювати іони феруму навіть за наявності інших мікроорганізмів. Крім того, вони можуть пригнічувати розвиток фітопатогенних бактерій і грибів шляхом конкурентного зв'язування заліза, що опосередковано знижує інфекційне навантаження на рослини^{2,29,30}. Сидерофори розглядають як перспективні агенти для біотехнології та сільського господарства, оскільки бактерії роду *Azotobacter* використовують як біодобрива і стимулятори росту рослин. Завдяки здатності мобілізувати залізо та інші метали сидерофори покращують мінеральне живлення рослин, підвищують родючість ґрунтів і можуть застосовуватися у біоремедіації забруднених територій.

Сучасні дослідження останнього десятиліття підкреслюють значну роль *Azotobacter* sp. у підвищенні стійкості рослин до абіотичних стресів. Інокуляція насіння або ґрунту штамами *A. vinelandii* та *A. chroococcum* сприяє підвищенню толерантності рослин до посухи, засолення та дефіциту поживних елементів. Це пов'язано як із покращенням мінерального живлення, так і з індукцією антиоксидантних систем рослини та зміною гормонального балансу^{30,31}. Деякі ізоляти *A. beijerinckii* та *A. salinestris* мають специфічні властивості, зокрема стійкість до підвищеної солоності, що робить їх перспективними для використання в деградованих або засолених ґрунтах³².

У польових умовах застосування інокулянтів на основі бактерій роду *Azotobacter* сприяє підвищенню врожайності різних сільськогосподарських та овочевих культур — пшениці, кукурудзи, рису тощо. При цьому ефективність біопрепаратів залежить від сумісності штаму з рослиною-господарем, типу ґрунту та агрокліматичних умов. Використання *Azotobacter* sp. для інокуляції насіння може підвищувати врожайність у середньому на 10–25% за умов помірного дефіциту сполук нітрогену в ґрунті³³.

Таким чином, рід *Azotobacter* є важливим компонентом ґрунтової мікробіоти, що забезпечує багатофакторний позитивний вплив на рослини через поєднання азотофіксації, синтезу фітогормонів, мобілізації мікроелементів та індукції стресостійкості. Сучасні дослідження підтверджують перспективність використання як класичних видів (*A. chroococcum*, *A. vinelandii*), так і нових штамів для створення ефективних біодобрив нового покоління, орієнтованих на сталий розвиток агросистем.

²⁸ AS Cornish, WJ Page and AS Paau, 'Aminochelin, a Catecholamine Siderophore Produced by *Azotobacter vinelandii*' (1988) 134(2) *Journal of General Microbiology* 453–460 <https://doi.org/10.1099/00221287-134-2-453>.

²⁹ AM Sidebottom and CD Murphy, 'The Siderophore Metabolome of *Azotobacter vinelandii*' (2015) 82(1) *Applied and Environmental Microbiology* 27–39 <https://doi.org/10.1128/AEM.03160-15>.

³⁰ P Barman, S Dey and S Mukherjee, 'Azotobacter: A Potential Biofertilizer for Soil and Plant Health Management' (2020) 27(12) *Saudi Journal of Biological Sciences* 3634–3640 <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.004>.

³¹ R Backer, JS Rokem, G Ilangumaran, J Lamont, D Praslickova, E Ricci, S Subramanian and DL Smith, 'Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants' (2018) 9 *Frontiers in Plant Science* 1473 <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>.

³² RS Kumar, V Rani and N Tuteja, 'Azotobacter vinelandii Helps to Combat Chromium Stress in Rice by Maintaining Antioxidant Machinery' (2021) 11 3 *Biotech* 275 <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02835-3>.

³³ A Aasfar, A Bargaz, K Yaakoubi, A Hilali, I Bennis, Y Zeroual and IM Kadmiri, 'Nitrogen Fixing *Azotobacter* Species as Potential Soil Biological Enhancers for Crop Nutrition and Yield Stability' (2021) 12 *Frontiers in Microbiology* 628379 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>.

2.3. Стійкість до пестицидів та біодеградаційний потенціал бактерій роду *Azotobacter*

2.3.1. Толерантність *Azotobacter* sp. до пестицидного навантаження

Пестициди — це хімічні або біологічні препарати, які застосовують для захисту культурних рослин, запасів сільськогосподарської продукції та контролю шкідливих організмів, зокрема бур'янів, комах, грибів і збудників хвороб. Їх основне призначення полягає у підвищенні врожайності та стабілізації агроєкосистем шляхом зменшення втрат від біотичних факторів. Залежно від об'єкта дії пестициди поділяють на гербіциди (контроль бур'янів), інсектициди (захист від комах-шкідників), фунгіциди (пригнічення розвитку грибних патогенів), а також інші групи, такі як родентициди та регулятори росту рослин. Попри агрономічну ефективність, їх широке застосування супроводжується екологічними ризиками, пов'язаними з накопиченням у довкіллі. Потрапляючи у ґрунт, поверхневі та підземні води, пестициди можуть тривалий час зберігатися в екосистемах, порушуючи структуру мікробних угруповань, процеси кругообігу біогенних елементів і функціонування ґрунтової біоти. Особливу небезпеку становить здатність окремих діючих речовин та продуктів їх трансформації акумулюватися в компонентах екосистем і чинити токсичний вплив на нецільові організми^{34,35,36}.

Інтенсивне застосування пестицидів у сучасному землеробстві формує постійний селективний тиск на ґрунтову мікробіоту, що призводить до загибелі чи інгібування чутливих мікроорганізмів і селекції стійких штамів. У цьому контексті бактерії роду *Azotobacter* демонструють підвищену толерантність до широкого спектра пестицидів, зокрема органофосфатів (хлорпірифос), карбаматів і хлорорганічних інсектицидів^{37,38,39}. Експериментальні дані свідчать, що *A. chroococcum* та *A. vinelandii* зберігають здатність до росту навіть за високих концентрацій хлорпірифосу, які суттєво інгібують ріст більшості ґрунтових бактерій⁴⁰. У контрольованих умовах встановлено, що ці культури не лише витримують токсичне навантаження, але й підтримують інтенсивність дихання та метаболічну активність без значного пригнічення росту.

Механізми такої стійкості є багатофакторними. Провідну роль відіграє антиоксидантна система клітини, зокрема ферменти каталаза та супероксиддисмутаза, які нейтралізують активні форми кисню, індуковані пестицидами³⁷. Іншим важливим захисним механізмом є утворення екзополісахаридного матриксу, який створює бар'єр між клітиною та токсичними сполуками⁴¹. Бактерії роду *Azotobacter* здатні також до перебудови метаболічних процесів у відповідь на стрес, що проявляється зміною інтенсивності дихання та перерозподілом енергетичних потоків у клітині³⁸. Це дає змогу бактеріям підтримувати життєздатність у забруднених ґрунтах без істотної втрати функціональної активності.

³⁴ P Calow, 'Pesticides' (2020) *Encyclopaedia Britannica* <https://www.britannica.com/science/pesticide>.

³⁵ RL Metcalf, 'Insect Control' (2019) in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* <https://doi.org/10.1002/14356007>.

³⁶ D Pimentel, 'Environmental and Economic Costs of the Application of Pesticides Primarily in the United States' (2005) 21 *Environment, Development and Sustainability* 1–23 <https://doi.org/10.1007/s10668-005-7314-2>.

³⁷ PN Bhattacharyya and DK Jha, 'Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR): Emergence in Agriculture' (2012) 28(4) *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 1327–1350 <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3656-9>.

³⁸ G Chennappa, MY Sreenivasa and others, 'Azotobacter— A Natural Resource for Bioremediation of Toxic Pesticides in Soil Ecosystems' (2019) in *New and Future Developments in Microbial*.

³⁹ WK Mousa and others, 'Microbial Degradation of Organophosphate Pesticides: Mechanisms and Environmental Applications' (2021) 268 *Environmental Pollution* 115123 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115123>.

⁴⁰ V Conde-Ávila and others, 'Growth and Biodegradation Potential of *Azotobacter vinelandii* under Pesticide Stress' (2021) 11 *AMB Express* 78 <https://doi.org/10.1186/s13568-021-01227-5>.

⁴¹ C Gurikar and others, 'Exopolysaccharides in Stress Tolerance and Microbial Survival' (2016) 34(5) *Biotechnology Advances* 728–741 <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.03.005>.

2.3.2. Біодеградація пестицидів бактеріями роду *Azotobacter*

Окрім стійкості до ксенобіотиків, представники роду *Azotobacter* здатні до трансформації та часткової деградації низки пестицидів. За природних умов ці процеси реалізуються переважно у складі мікробних консорціумів через механізми кометаболізму⁴². Встановлено, що бактерії *Azotobacter* sp. можуть здійснювати гідролітичне розщеплення орґанофосфатних сполук або прискорювати їхню деградацію шляхом індукції позаклітинних ферментних систем³⁸. Деградація таких пестицидів відбувається завдяки розриву фосфоефірних зв'язків з подальшою трансформацією проміжних метаболітів до менш токсичних сполук³⁹.

Окремі штами *Azotobacter* sp. здатні розкладати такі пестициди, як ліндан, форат, ендосульфан і пендиметалін^{43,44}. При цьому ступінь деградації може сягати високих значень за оптимальних умов культивування, що підтверджує їхній потенціал як біодеструкторів⁴⁵.

Важливо підкреслити, що *Azotobacter* sp. часто не є первинним біодеградантом, а виконує роль функціонального модифікатора ґрунтового мікробного середовища. Завдяки фіксації молекулярного азоту та синтезу ауксиноподібних сполук зростає загальна метаболічна активність ризосфери, що опосередковано прискорює деградацію пестицидів іншими мікроорґанізмами³⁷.

Гліфосат є одним із найпоширеніших гербіцидів фосфонатної природи, деградація якого у ґрунті відбувається головно за участі мікроорґанізмів. Основним продуктом первинного розщеплення є амінометилфосфонові кислота (АМРА), яка далі розкладається до вуглекислого газу та інших неорґанічних сполук^{46,47}. Хоча основними біодеструкторами гліфосату є представники родів *Pseudomonas*, *Bacillus* та *Ochrobactrum*, окремі дослідження підтверджують участь *Azotobacter* у процесах його трансформації³⁹. Зокрема, показано, що бактерії роду *Azotobacter* здатні здійснювати кометаболічну деградацію гліфосату у складі ґрунтових мікробних асоціацій.

Крім прямої трансформації, роль *Azotobacter* sp. полягає у підтриманні умов для активної деградації гербіциду іншими мікроорґанізмами. Це реалізується через фіксацію атмосферного азоту, що підвищує доступність поживних елементів у ризосфері, а також через виділення біологічно активних метаболітів, які стимулюють ферментативну активність ґрунтових мікроорґанізмів^{37,48}. Таким чином, участь *Azotobacter* у трансформації гліфосату слід розглядати як опосередкований, але екологічно значущий механізм прискорення його біодеградації у ґрунтових системах.

2.3.3. Вплив пестицидів на бактерії роду *Azotobacter*

Досліджено чутливість до дії низки пестицидів (гербіциду Раундапу, інсектициду Антигусін та фунгіциду Квадрісу) та особливості росту азотофіксувальних бактерій роду *Azotobacter* у рідкому

⁴² RM Atlas and R Bartha, *Microbial Ecology: Fundamentals and Applications* (4th edn, Benjamin/Cummings 2005).

⁴³ N Anupama and S Paul, 'Biodegradation of Organochlorine and Organophosphate Pesticides by Bacteria' (2009) 30(3) *Journal of Environmental Biology* 323–327.

⁴⁴ KS Anupama and S Paul, 'Ex Situ and In Situ Biodegradation of Lindane by *Azotobacter chroococcum*' (2010) 45(1) *Journal of Environmental Science and Health, Part B* 58–66 <https://doi.org/10.1080/03601230903433542>.

⁴⁵ G Chennappa and others, 'Pesticide Degradation Potential of *Azotobacter* spp. Isolated from Agricultural Soils' (2018) 7(5) *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 1234–1245.

⁴⁶ MC Zabaloy, JL Garland and MA Gómez, 'An Assessment of Glyphosate Impact on Soil Microbial Communities' (2008) 39(2) *Applied Soil Ecology* 176–183 <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.09.008>.

⁴⁷ M Kuznietsova and VD Chmil, 'Glyphosate: Behaviour in the Environment and Residue Levels' (2010) 48(1) *Modern Problems of Toxicology* 87–95.

⁴⁸ L Gianfreda and MA Rao, 'Potential of Extracellular Enzymes in Remediation of Polluted Soils: A Review' (2008) 35(4) *Enzyme and Microbial Technology* 339–354 [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(03\)00110-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(03)00110-9).

живильному середовищі за їхнього впливу. Усі пестициди за класифікацією ВООЗ належать до III класу небезпечності (малонебезпечні сполуки)^{49,50}.

Гербицид Раундап (рис. 1) – універсальний засіб для боротьби з багаторічними та однорічними бур'янами не лише в сільському господарстві, а й у лісівництві, його використовують для контролю небажаної рослинності на залізничних коліях та смугах відведення, на присадибних ділянках тощо. Діюча речовина – гліфосат (рис. 2) є інгібітором ферменту рослин 5-енолпірувіл-шикімат-3-фосфатсинтази (5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase – EPSP synthase, EPSPS), який бере участь у шикиматному шляху біосинтезу ароматичних амінокислот (фенілаланіну, тирозину та триптофану) у рослин, грибів і бактерій. Інгібування EPSPS гліфосатом призводить до зниження інтенсивності біосинтезу вторинних метаболітів та структурних білків, що обумовлює порушення білкового обміну в клітинах рослин. Після потрапляння гліфосату на рослину він швидко розноситься по судинній системі до точок росту та коренів, зумовлюючи поступове пожовтіння, відмирання надземної маси та повну загибель рослини.



Рисунок 1. Препаративні форми гербициду Раундапу

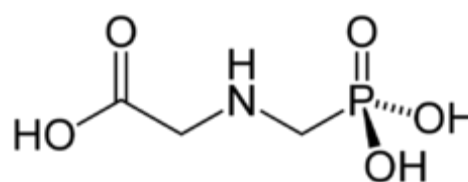


Рисунок 2. Структурна формула гліфосату (N-(фосфометил)-гліцин), $C_3H_8NO_5P$ ⁵¹

У зв'язку з відсутністю персистентності (залишкової дії в ґрунті), гліфосат є ідеальним компонентом для інтегрованих програм застосування гербицидів. Завдяки швидкій інактивації мікроорганізмами та міцному зв'язуванню з ґрунтом він не накопичується і не шкодить наступним культурам у сівозміні.

Інсектицид Антигусінь – поширений засіб для боротьби з комахами-шкідниками рослин (рис. 3). Діюча речовина – цигалотрин – існує у вигляді суміші ізомерів, серед яких найбільшою активністю вирізняється лямбда-цигалотрин, структурна формула якого наведена на рис. 4.



Рисунок 3. Препаративні форми інсектициду. Антигусінь

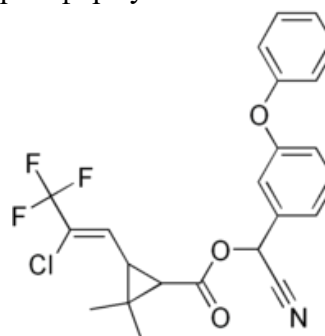


Рисунок 4. Структурна формула лямбда-цигалотрину, $C_{23}H_{19}ClF_3NO_3$ ⁵²

⁴⁹ Hygienic Classification of Pesticides by Hazard Level (DSP 8.8.1.2.002-98) <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va002282-98#Text>.

⁵⁰ Insecticides' Agrolife <https://agrolife.ua/ua/szr-sredstva-zaschity-rasteniy/insektidy.html>.

⁵¹ Y Hrynko, 'Features of Desiccation: When, Why and How?' *Agronom* (2021) <https://www.agronom.com.ua/>.

⁵² 'Agrarii Razom Portal' <https://agrarii-razom.com.ua/>.

Антигусінь – це контактний-кишковий інсектицид, який паралізує нервову систему комах-шкідників на всіх стадіях розвитку. Препарат проникає в організм комах разом із соком чи листям або ж крізь покриви комах (унаслідок контакту з обробленою рослиною). Діюча речовина (лямбда-цигалотрин) порушує обмін кальцію в синапсах та роботу натрій-калієвих каналів. Це блокує передачу нервових імпульсів, унаслідок чого у шкідника миттєво настає м'язовий параліч, після чого він перестає харчуватися і швидко гине⁵³.

Квадріс (рис. 5) – системний фунгіцид широкого спектру дії для захисту овочевих культур від комплексу хвороб, який належить до нового класу препаратів – стробілуринів. Діюча речовина – азаксистробін ($C_{22}H_{17}N_3O_5$) (рис. 6).



Рисунок 5. Препаративні форми фунгіциду Квадрісу

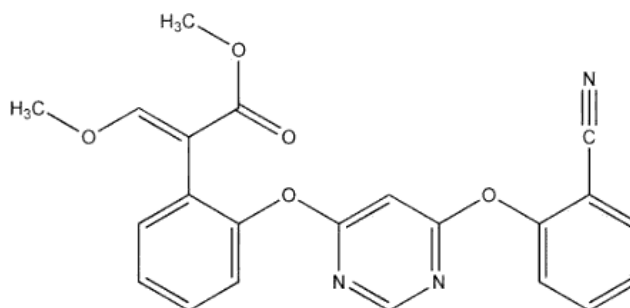


Рисунок 6. Структурна формула азаксистробіну⁵⁴

Механізм дії препарату ґрунтується на блокуванні мітохондріального дихання у клітинах патогенів, що призводить до негайної зупинки розвитку гриба та його загибелі. Квадріс блокує проростання спор, утворення міцелію, запобігаючи подальшому поширенню хвороби на здорові рослини.

Ґрунтові мікроорганізми є дуже чутливими до дії пестицидів, оскільки ці сполуки можуть порушувати ключові метаболічні процеси, зокрема дихання, синтез ферментів і клітинних структур. Навіть низькі концентрації токсикантів здатні змінювати структуру мікробних угруповань. У процесі адаптації до таких змінених умов мікроорганізми можуть набувати стійкості або ж змінювати свої фізіолого-біохімічні властивості, що потенційно впливає на загальний рівень родючості ґрунту. Найбільш вразливою до токсичних сполук зазвичай є логарифмічна фаза росту, коли клітини інтенсивно діляться та активно синтезують білки, нуклеїнові кислоти й структурні компоненти клітин. У випадку азотофіксувальних бактерій навіть низькі концентрації ксенобіотиків можуть істотно впливати на нагромадження біомаси та процес діазотрофії. Додавання Раундапу до рідкого середовища Ешбі спричиняло зниження нагромадження біомаси обома штамми азотофіксувальних бактерій упродовж першої доби росту (рис. 7).

⁵³ 'SuperAgronom Portal' <https://superagronom.com>.

⁵⁴ 'Growex Market: Azoxystrobin Information' <https://growex.market/>.

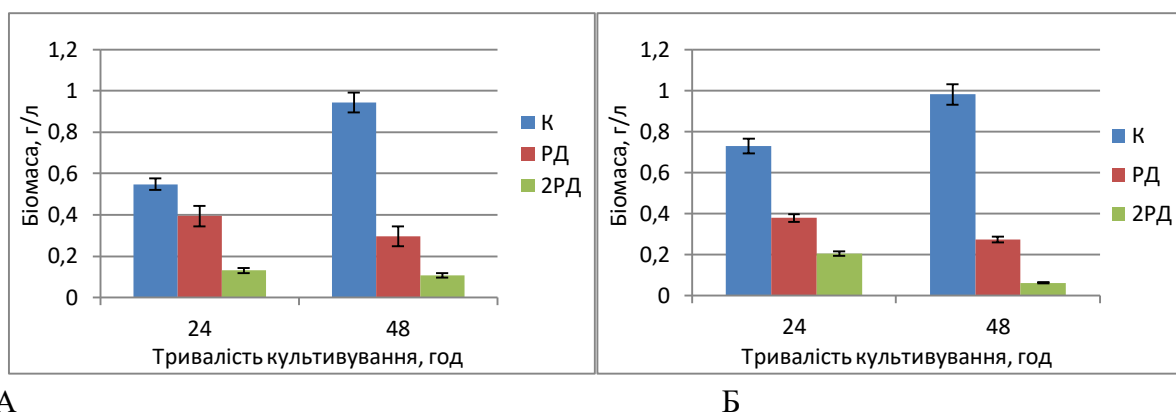


Рисунок 7. Нагромадження біомаси азотофіксувальними бактеріями за впливу гербіциду Раундапу у різних концентраціях: А – *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272, Б – *Azotobacter chroococcum* А1 (К – контроль; РД – рекомендована доза; 2РД – подвійна доза)

На другу добу культивування у середовищі без гербіциду виявлено зростання біомаси азотофіксувальних бактерій, натомість за дії рекомендованої дози Раундапу спостерігали пригнічення росту обох штамів – у 3,16 раза для *A. chroococcum* ВКМ В-1272, майже у 3,6 раза – для *A. chroococcum* А1. За подвійної концентрації Раундапу біомаса обох досліджуваних культур знижувалася у 8,7 та 15,6 раза, відповідно.

Застосування диско-дифузійного методу показало дещо відмінний результат щодо чутливості азотофіксувальних бактерій до дії Раундапу: у рекомендованій концентрації (8 мл/л) гербіцид не впливав на ріст музейної культури азотофіксувальних бактерій. За вдвічі вищої концентрації Раундапу унаслідок дифузії в агар спостерігали незначне інгібування росту бактерій *A. chroococcum* ВКМ В-1272, про що свідчить утворення стерильних зон навколо індикаторних дисків, діаметр яких становив 8–10 мм (рис. 8).

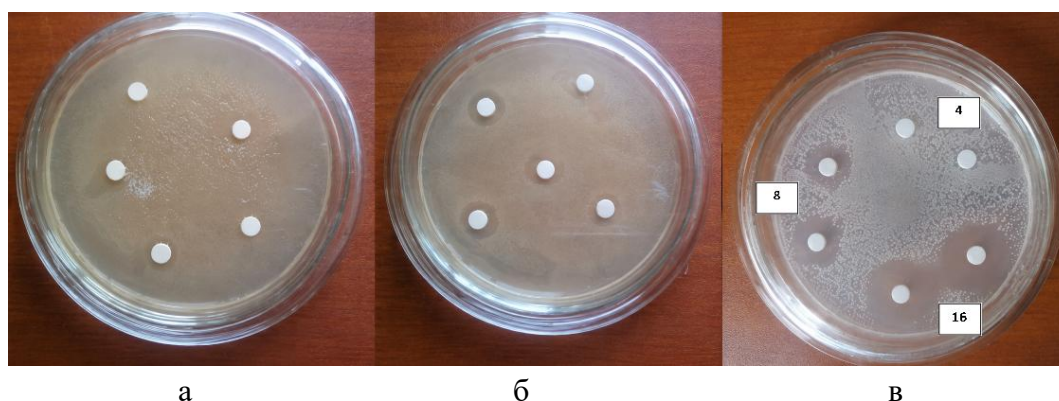


Рисунок 8. Чутливість бактерій *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272 (А – 8 мл/л; Б – 16 мл/л) та *Azotobacter chroococcum* А1 (В) до дії гербіциду Раундапу

Бактерії *A. chroococcum* А1 виявилися більш чутливими до дії гербіциду – навіть за вдвічі нижчої за рекомендовану (4 мл/л) дози Раундапу спостерігали появу стерильних зон навколо дисків. За рекомендованої до використання дози гербіцид інгібував ріст бактерій – діаметр зони затримки росту становив 11–14 мм, за подвійної (16 мл/л) діаметр стерильної зони сягав 16–17 мм.

Відмінності чутливості азотофіксувальних бактерій до Раундапу у в рідкому та на щільному живильних середовищах можуть бути зумовлені як фізико-хімічними властивостями самого

гербіциду, так і особливостями фізіологічного стану бактеріальних клітин. У рідкому середовищі гліфосат перебуває у розчиненому стані та безпосередньо контактує з планктонними клітинами, що може посилювати його інгібувальний вплив на нагромадження біомаси та метаболічні процеси. Натомість на щільному агаризованому середовищі дифузія гліфосату може бути обмеженою через його адсорбцію компонентами середовища, тоді як ріст бактерій у складі колоній або біоплівкоподібних структур підвищує їхню толерантність до дії токсиканта⁵⁵.

За впливу інсектициду Антигусінь спостерігали зниження нагромадження біомаси обох штамів азотофіксувальних бактерій відповідно до концентрації інсектициду (рис. 9). Бактерії *A. chroococcum* A1 виявилися менш чутливими до дії інсектициду: на другу добу культивування Антигусінь у рекомендованій дозі пригнічувала нагромадження біомаси бактеріями *A. chroococcum* ВКМ В-1272 у 2,4 раза, у подвійній дозі – у 3,8 раза; у випадку *A. chroococcum* A1 біомаса порівняно з контролем була нижчою за дії Антигусені у 1,4 та 2,4 раза відповідно.

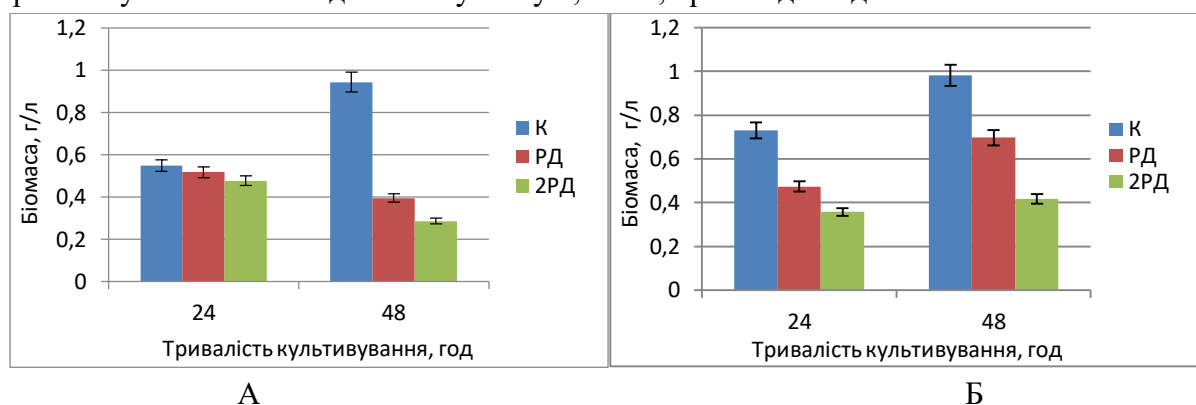


Рисунок 9. Нагромадження біомаси азотофіксувальними бактеріями за впливу інсектициду Антигусінь у різних концентраціях: А – *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272, Б – *Azotobacter chroococcum* A1 (К – контроль; РД – рекомендована доза; 2РД – подвійна доза)

Використовуючи диско-дифузійний метод, виявлено незначне інгібування росту досліджуваних бактерій за подвійної дози Антигусені: діаметр зони затримки росту для *A. chroococcum* ВКМ В-1272 становив 7–8 мм, а для *A. chroococcum* A1 – 9–12 мм. Отже, досліджувані культури азотофіксувальних бактерій малочутливі до інсектициду Антигусінь (рис. 10).

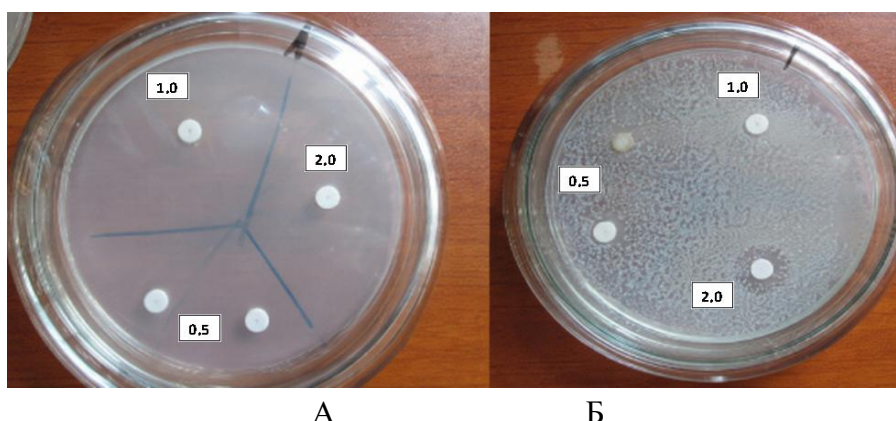


Рисунок 10. Чутливість *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272 (А) та *Azotobacter chroococcum* A1 (Б) до дії інсектициду Антигусінь у концентраціях 0,5 мл/л; 1,0 мл/л та 2,0 мл/л

⁵⁵ F Burul, K Barić, J Lakić and A Milanović-Litre, 'Herbicides effects on symbiotic nitrogen-fixing bacteria' (2022) 23(1) *Journal of Central European Agriculture* 89–102 <https://doi.org/10.5513/JCEA01/23.1.3320>.

Фунгіцид Квадріс у рекомендованій до використання дозі упродовж першої доби суттєво не впливав на нагромадження біомаси обома штамми азотофіксувальних бактерій. На другу добу виявлено пригнічення росту азотофіксувальних бактерій за дії рекомендованої та подвійної доз фунгіциду Квадріс: нагромадження біомаси бактеріями *A. chroococcum* ВКМ В-1272 знизилося у 1,5 та 2,9 раза порівняно з контролем, бактеріями *A. chroococcum* А1 – у 1,8 та 2,9 раза відповідно (рис. 11).

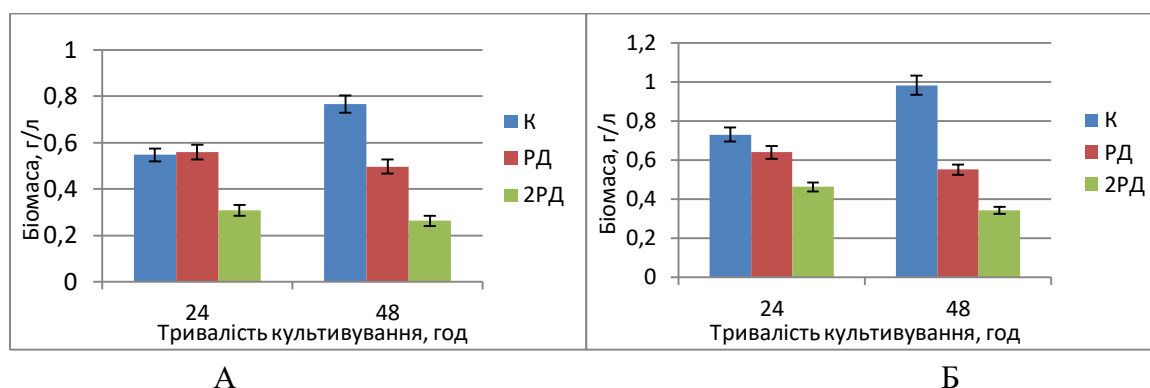


Рисунок 11. Нагромадження біомаси азотофіксувальними бактеріями за фунгіциду Квадрісу у різних концентраціях: А – *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272, Б – *Azotobacter chroococcum* А1 (К – контроль; РД – рекомендована доза; 2РД – подвійна доза)

У результаті проведених досліджень встановлено, що пестициди пригнічують нагромадження біомаси азотофіксувальними мікроорганізмами *Azotobacter* sp. Серед досліджених препаратів найсильніший інгібувальний ефект виявив гербіцид Раундап, який є чи не найпопулярнішим в Україні препаратом для боротьби з небажаною рослинністю.

Відомо, що деякі пестициди, зокрема, на основі гліфосату, проявляють високу здатність до зв'язування частинками ґрунту. Це так звана залишкова токсикація ґрунтів. Також у сільськогосподарській практиці з метою контролю забур'яненості посівних площ та підвищення врожайності застосовують повторні обробки ділянок гербіцидами (проти так званої другої хвилі сходів). Оскільки гліфосат може акумулюватися в ґрунті і має тривалий період напіврозпаду (до 100 днів), ми дослідили нагромадження біомаси азотофіксувальними бактеріями *A. chroococcum* А1, попередньо вирощеними на середовищі з Раундапом (8 мл/л), за впливу вище згаданих пестицидів. Результати дослідження показано на рис. 12.

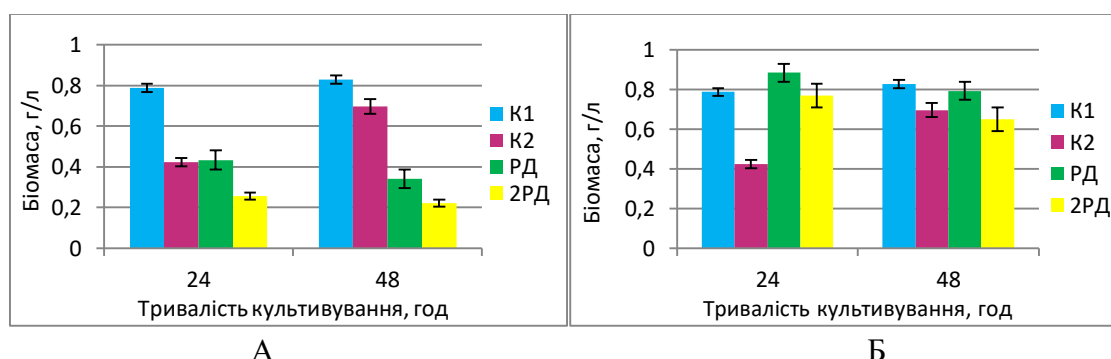
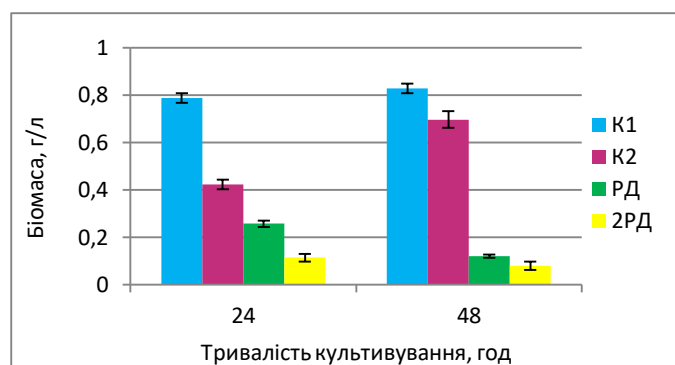


Рисунок 12. Нагромадження біомаси бактеріями *Azotobacter chroococcum* А1, попередньо вирощеними у середовищі з гербіцидом Раундапом, за впливу пестицидів Раундапу (А), Антигусені (Б) та Квадрісу (В) у різних концентраціях (К1 – вихідна культура; К2 – культура, вирощена за впливу Раундапу; РД – рекомендована доза; 2РД – подвійна доза)



В

Продовження рисунка 12. Нагромадження біомаси бактеріями *Azotobacter chroococcum* A1, попередньо вирощеними у середовищі з гербіцидом Раундапом, за впливу пестицидів Раундапу (А), Антигусені (Б) та Квадрісу (В) у різних концентраціях (K1 – вихідна культура; K2 – культура, вирощена за впливу Раундапу; РД – рекомендована доза; 2РД – подвійна доза)

Згідно з результатами досліджень, нагромадження біомаси бактеріями *A. chroococcum* A1, попередньо вирощеними на середовищі з гербіцидом, змінювалося неоднаково за повторної обробки пестицидами. Найменше біомаси нагромаджували бактерії за повторного вирощування у середовищі з фунгіцидом Квадрісом. Натомість вирощені попередньо у середовищі з Раундапом азотофіксувальні бактерії нагромаджували у середовищі з інсектицидом Антигусінь біомасу, яка достовірно не відрізнялася від біомаси вихідної культури. Можна припустити, що попереднє культивування бактерій за дії гербіциду підвищує їхню чутливість до препарату, водночас сприяючи формуванню адаптаційних механізмів чи активуванню ферментних систем за умов дефіциту джерел нітрогену.

Вплив пестицидів на ґрунтові мікроорганізми має комплексний характер – як на нагромадження біомаси, так і на ключові метаболічні процеси, зокрема біологічну фіксацію азоту. Зокрема, для представників роду *Azotobacter* показано, що гербіциди, включно з гліфосатом, здатні інгібувати активність нітрогеназного комплексу, що призводить до зниження інтенсивності відновлення молекулярного азоту до амонійних форм і, відповідно, до зменшення їх накопичення у середовищі культивування. Експериментально встановлено, що навіть за відносно низьких доз гліфосату спостерігається істотне зниження азотфіксувальної активності *A. chroococcum* та *A. vinelandii*, тоді як підвищення концентрацій призводить до вираженого інгібування росту та метаболічної активності клітин. Це узгоджується з даними про чутливість процесу діазототрофії до дії ксенобіотиків, які порушують активність нітрогенази і пов'язаних з нею ферментних систем^{56,57,58,59}.

⁵⁶ H Chen, H Wang, J Yang, Y Yuan, W Tang, X Wu, Q Zhong and ST Yang, 'Growth inhibition and activity stimulation of non-target nitrogen-fixing bacterium *Azotobacter vinelandii* by herbicide florasulam' (2025) 495 *Journal of Hazardous Materials* 138828 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138828>.

⁵⁷ T Alcarria Vllora, 'Efecto de la aplicación del glifosato y un herbicida comercial basado en glifosato sobre bacterias fijadoras de nitrógeno *Azotobacter chroococcum*' (2025) Universidad Politécnica de Valencia <https://riunet.upv.es/handle/10251/221451>.

⁵⁸ HI Zvir and GM Rizun, 'Vplyv herbitsydu Wang, J Yang, Y Yuan, W Tang, X Wu, Q Zhong and ST Yang, 'Growth inhibition and activity stimulation of non-target nitrogen-fixing bacterium *Azotobacter vinelandii* by herbicide florasulam' (2025) 495 *Journal of Hazardous Materials* 138828 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138828>.

⁵⁹ T Alcarria Vllora, 'Efecto de la aplicación del glifosato y un herbicida comercial basado en glifosato sobre bacterias fijadoras de nitrógeno *Azotobacter chroococcum*' (2025) Universidad Politécnica de Valencia <https://riunet.upv.es/handle/10251/221451>.

Відновлення молекулярного азоту до амоніаку вільноживучими азотофіксувальними бактеріями *A. chroococcum* A1 пригнічували усі досліджувані пестициди залежно від фізико-хімічних властивостей токсиканта, його концентрації у середовищі, фази росту культури та попереднього вирощування за впливу гербіциду Раундапу (рис. 13). Найвищі концентрації іонів амонію виявлено в середовищі з інсектицидом Антигусін – як у культури, виділеної з препарату «Азотофіт», так і у вирощених попередньо за впливу Раундапу бактерій *A. chroococcum* A1. Бактерії *A. chroococcum* A1, попередньо вирощені у середовищі з гербіцидом, за впливу рекомендованої та подвійної дози фунгіциду Квадрісу нагромаджували найменше іонів амонію порівняно з іншими пестицидами.

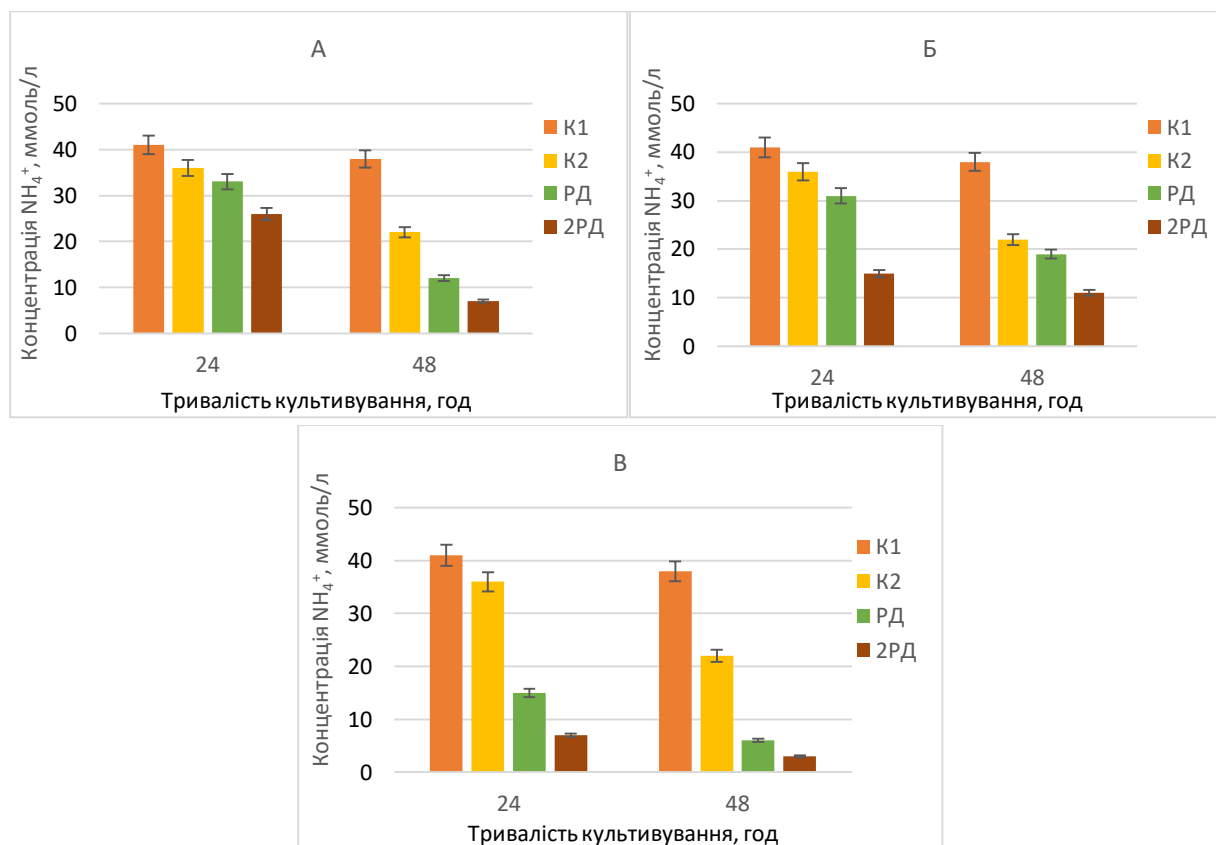


Рисунок 13. Вплив пестицидів Раундапу (А), Антигусені (Б) та Квадрісу (В) у різних концентраціях на утворення іонів амонію бактеріями *Azotobacter chroococcum* A1, попередньо вирощеними у середовищі з гербіцидом Раундапом (K1 – контроль; K2 – культура, вирощена за впливу Раундапу; RD – рекомендована доза; 2RD – подвійна доза)

Таким чином, за дії пестицидів спостерігається не лише пригнічення росту мікроорганізмів і зменшення нагромадження біомаси, але й порушення азотофіксувальної функції, що проявляється зниженням концентрації іонів амонію в середовищі культивування. Це свідчить про вплив ксенобіотиків на ключові елементи циклу нітрогену в мікробних системах.

2.4. Вплив плівкоутворювальних піноутворювачів на бактерії *A. chroococcum* ВКМ В-1272

2.4.1. Пожежі та засоби пожежогасіння

Пожежі здавна були одним з найбільших стихійних лих, що забирали безліч людських життів і завдавали величезних матеріальних збитків. Незважаючи на технічний прогрес у галузі пожежної

безпеки та захисту, великого асортименту засобів пожежогасіння, проблема пожежогасіння залишається актуальною і сьогодні.

Пожежа є складним комплексом фізичних та хімічних процесів, серед яких основним є процес горіння. За своєю природою горіння є хімічною реакцією між речовиною, що горить, та окисником, і супроводжується виділенням тепла. Утворене тепло затрачається на нагрівання горючих матеріалів та підтримання горіння, на нагрівання продуктів горіння в ході хімічних реакцій. Практика та досвід гасіння пожеж показують, що горіння більшості горючих матеріалів припиняється за умови зниження концентрації кисню у повітрі приміщення до 14–16%⁶⁰.

Основними причинами пожеж є необережне поводження з вогнем; порушення правил встановлення, монтажу та експлуатації печей, теплогенераторів, електромереж та електроустаткування; порушення режимів технологічних процесів; підпали умисні чи ненавмисні; порушення протипожежних вимог під час проведення вогневих робіт; ігри дітей з сірниками; післяжнивне спалювання рослинних решток; природні явища (блискавка, посуха) тощо.

Причиною лісових пожеж та пожеж на об'єктах промисловості та інфраструктури в Україні стала війна, яку розпочала російська федерація у лютому 2022 р. Обстріли та ракетні удари по об'єктах промисловості та інфраструктури призводять до пожеж, які спричиняють забруднення повітря, ґрунту та води. Продукти горіння, що потрапляють у повітря, містять токсичні гази та тверді частки, що спричинює забруднення ґрунту та води. Пожежа на нафтобазі у Василькові Київської області 26 лютого 2022 р. визнана масштабною техногенною екологічною катастрофою, яку спричинили попадання ракет та подальше спалахування нафтопродуктів. Унаслідок детонування артилерійських снарядів та ракет виникають пожежі з виділенням у довкілля токсичних органічних речовин, забрудненням ґрунтів, водойм з непоправними втратами для різноманіття організмів.

Процес горіння припиняють усуненням або обмеженням одного з чинників, необхідних для підтримання полум'я. До основних методів пожежогасіння належать: зниження концентрації кисню в зоні горіння, ізоляція осередку пожежі від доступу повітря, охолодження горючих матеріалів до температури, нижчої за температуру займання, а також розбавлення горючих речовин негорючими компонентами. Крім того, ефективними способами є введення інертних газів, які зменшують вміст окисника у повітрі, інгібування хімічних реакцій горіння спеціальними речовинами та механічне збивання полум'я струменем води, порошку або газу. Вибір способів і методів гасіння пожеж, а також вогнегасних речовин (рис. 14) та їх носіїв визначають у кожному конкретному випадку залежно від масштабу займання, природи горючих речовин і матеріалів, а також стадії розвитку пожежі⁶¹. Від правильності вибору вогнегасних речовин і засобів пожежогасіння залежить ефективність гасіння пожежі.

⁶⁰ JL Torero, JI Gerhard, MF Martins, MAB Zanoni, TL Rashwan, JKBrown and others, 'Processes Defining Smouldering Combustion: Integrated Review and Synthesis' (2020) 81 *Progress in Energy and Combustion Science* 100869 <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100869>.

⁶¹ Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychaynykh sytuatsii, 'Osnovy pozhezhnoi bezpeky' (2024) <https://nmc.dsns.gov.ua/upload/1/2/2/8/1/sait-pdf-faili-1-opr-kons-zag-p-ki.pdf>.

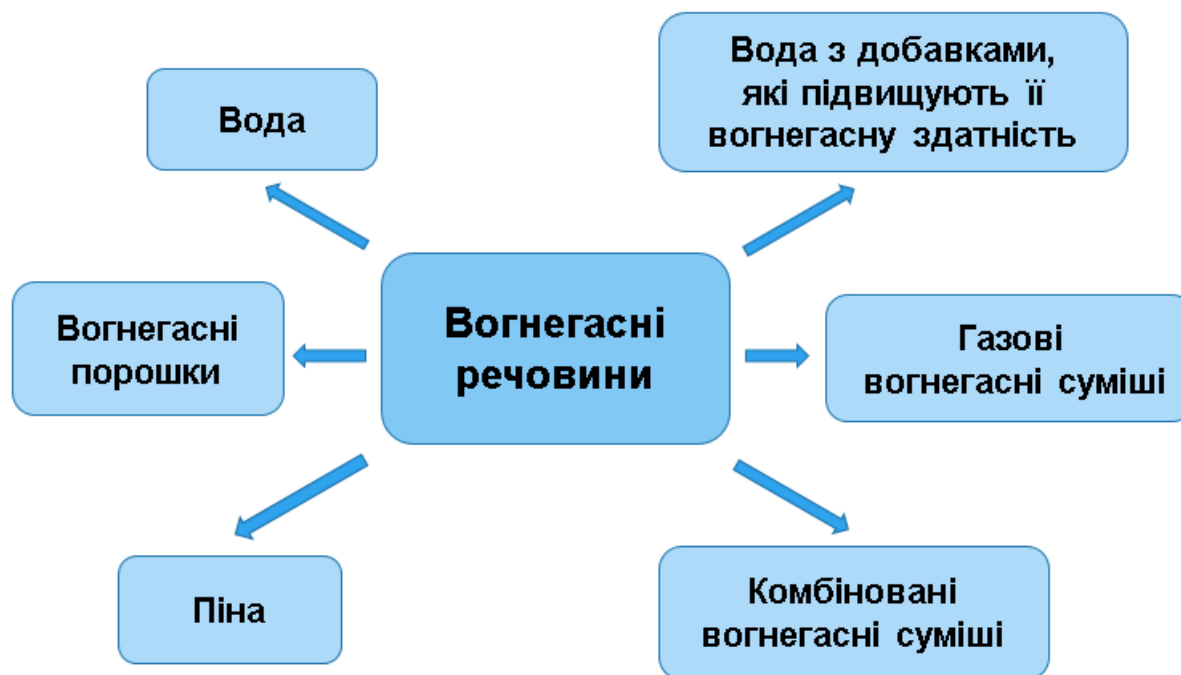


Рисунок 14. Види вогнегасних речовин

Застосування піни для гасіння пожеж запропонував у 1904 р. інженер А. Г. Лоран. Він висунув ідею отримання повітряно-механічної піни та застосування її для пожежогасіння, проте перші спроби застосування цього методу були реалізовані наприкінці XIX – на початку XX ст. для гасіння нафти і нафтопродуктів⁶².

Піни широко використовують для ліквідації пожеж твердих матеріалів і горючих рідин, оскільки вони забезпечують одночасний вплив на декілька механізмів припинення горіння. Вогнегасний ефект піни полягає в охолодженні поверхні пального, ізоляції осередку горіння від доступу кисню повітря, зменшенні теплового випромінювання від полум'я до поверхні горючої речовини, а також у розбавленні газового середовища водяною парою, яка утворюється під час випаровування рідкої фази піни. Це забезпечує ефективне припинення процесів тепло- та масообміну, необхідних для підтримання горіння⁶³.

Піноутворювачі класифікують за сферою застосування на засоби загального та спеціального призначення. Піноутворювачі загального призначення використовують головно для гасіння пожеж твердих горючих матеріалів і неполярних легкозаймистих рідин. Зазвичай вони містять синтетичні або природні поверхнево-активні речовини і є концентрованими водними композиціями, які перед використанням розбавляють водою у визначених пропорціях для утворення вогнегасної піни.

Піноутворювачі спеціального призначення створюють на основі флуорвмісних поверхнево-активних речовин або їх комбінацій з іншими компонентами. Їхньою особливістю є здатність формувати на поверхні горючої рідини тонку водну плівку, яка перешкоджає випаровуванню пального та може самовідновлюватися після механічного пошкодження. Завдяки цьому знижується надходження парів горючої речовини у зону горіння та підвищується ефективність пожежогасіння.

⁶² JL Scheffey, 'Fire Fighting Foam Systems' (2016) in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th edn, Springer / NFPA).

⁶³ VM Kovalov, OV Kostenko and VV Taran, 'Zastosuvannia pinnykh vohnehasnykh rehovyn dlia hasinnia pozhzh klasiv A i B' (2020) 35 *Problemy Pozhezhnoi Bezpeky* 58–64.

За хімічною природою поверхнево-активних компонентів піноутворювачі спеціального призначення поділяють на протеїнові (protein, P), флуорпротеїнові (fluoroprotein, FP), плівкоутворювальні флуорпротеїнові (film-forming fluoroprotein, FFFP), синтетичні (synthetic, S) та флуорсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі типу AFFF (aqueous film-forming foam). Останні характеризуються високою здатністю до швидкого розтікання по поверхні горючих рідин і формування стабільної ізолювальної плівки^{64,65,66}.

Флуорсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі спеціального призначення (aqueous film forming foam AFFF) використовують головню для гасіння пожеж, спричинених займанням неполярних (водонерозчинних) легкозаймистих рідин (нафти, бензину, гасу, мазуту, мастильних матеріалів, бензолу, циклогексану тощо) та полярних (водорозчинних) горючих рідин (етилового, метилового та інших спиртів, а також органічних кислот, альдегідів, кетонів, полярних розчинників для лакофарбової промисловості тощо)⁶⁷. Серед основних місць використання AFFF є навчальні заклади, транспортні засоби протипожежної підготовки, кораблі, берегові та військові споруди.

Поверхнево-активні речовини, що входять до складу піни, представлені пер- та поліфторалкільними речовинами (PFAS). Тисячі цих речовин були розроблені ще у 1950-х роках, їх використовували як гідроізоляційні засоби, антипригарне покриття для посуду, волого- і плямостійке покриття для текстилю, упаковки харчових продуктів, змазки тощо завдяки їхній високій хімічній стабільності. Протягом останніх п'яти десятиліть AFFF відігравав важливу роль у військових і цивільних аеропортах у гасінні пожеж, у навчаннях з аварійних ситуацій та вогневої підготовки, реагуванні на пожежі або розливи палива та у реагуванні на надзвичайні ситуації⁶⁸.

Однією з ключових екологічних проблем пер- та поліфторалкільних речовин є їх надзвичайна стійкість до біотичного та абіотичного розкладання, що зумовлено високою енергією зв'язку C–F. У природних умовах більшість PFAS практично не зазнають повної мінералізації, а лише повільно трансформуються або мігрують між компонентами екосистем. Завдяки високій розчинності у воді значна частина PFAS є мобільною у водних системах і може переноситися поверхневими та підземними водами, потрапляючи у джерела питного водопостачання. Крім того, класичні процеси очищення стічних вод (біологічні та фізико-хімічні) зазвичай не забезпечують їх повного видалення, що зумовлює нагромадження цих сполук у навколишньому середовищі⁶⁹.

До складу багатьох AFFF входять перфлуоркарбонові кислоти (PFCA), які залежно від довжини вуглецевого ланцюга поділяють на коротколанцюгові та довголанцюгові^{70,71}. До довголанцюгових PFCA належать сполуки з вісьмома і більше атомами карбону, зокрема

⁶⁴ I Ross and J Hurst, 'Aqueous Film-Forming Foams (AFFF): Environmental Occurrence, Persistence and Impacts' (2019) 21(10) *Environmental Science: Processes & Impacts* 1809–1829 <https://doi.org/10.1039/C9EM00239F>.

⁶⁵ JB Tuovinen and M Blomqvist, 'Extinguishment Performance of Firefighting Foams' (2019) 32 *Fire Technology* 1457–1478 <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00852-4>.

⁶⁶ IA National Foam, 'Aqueous Film Forming Foam (AFFF) Technical Manual' (2020) <https://nationalfoam.com>.

⁶⁷ FM Williams, 'Firefighting Foams and Their Environmental Impacts' (2022) 46 *Journal of Hazardous Materials* 130–144 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127299>.

⁶⁸ I Ross and J Hurst, 'Aqueous Film-Forming Foams (AFFF): Environmental Occurrence, Persistence and Impacts' (2019) 21(10) *Environmental Science: Processes & Impacts* 1809–1829 <https://doi.org/10.1039/C9EM00239F>.

⁶⁹ IT Cousins, JC DeWitt, J Glüge, G Goldenman, D Herzke, R Lohmann, M Miller, CA Ng, M Scheringer and Z Wang, 'The high persistence of PFAS is sufficient for their management as a chemical class' (2020) 22 *Environmental Science: Processes & Impacts* 2307–2312 <https://doi.org/10.1039/D0EM00355G>.

⁷⁰ RC Buck, J Franklin, U Berger, JM Conder, IT Cousins, P de Voogt, AA Jensen, K Kannan, SA Mabury and SPJ van Leeuwen, 'Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins' (2011) 7 *Integrated Environmental Assessment and Management* 513–541 <https://doi.org/10.1002/ieam.258>.

⁷¹ J Wang, G Chen, Y Sun, Y Zhang, S Li, X Wang and others, 'Occurrence, transformation and environmental behaviour of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in aqueous film-forming foams (AFFF)' (2021) 752 *Science of the Total Environment* 141838 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141838>.

перфлуороктанова, перфлуорнонанова та перфлуордеканова кислоти, тоді як до коротколанцюгових відносять перфлуорбутанову та перфлуоргексанову кислоти), які почали активно використовувати як альтернативу токсичнішим довголанцюговим аналогам^{72,73}.

Довголанцюгові PFAS характеризуються більшою гідрофобністю, схильністю до сорбції на органічній речовині та біоаккумуляцією в живих організмах, тоді як коротколанцюгові PFAS є мобільнішими у водному середовищі, легше мігрують у ґрунтових водах, але мають меншу здатність до біоаккумуляції⁷⁴. Водночас їх екологічна небезпека не зникає, оскільки вони можуть демонструвати високу стійкість і тривале перебування в гідросфері. У мікробних системах PFAS можуть пригнічувати ріст, змінювати структуру мікробіоценозів ґрунту, знижувати ферментативну активність та впливати на процеси біогеохімічних циклів, зокрема нітрогену та карбону⁷⁵. Це пов'язують як із прямою мембранотоксичною дією, так і з індукцією окисного стресу, який викликають ці сполуки.

2.4.2. Вплив флуорсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів типу AFFF на бактерії роду *Azotobacter*

Мікроорганізми здатні метаболізувати широкий спектр органічних сполук, що зустрічаються в природному середовищі. Ця властивість значною мірою зумовлена наявністю індукцибельних ферментних систем, які активуються у відповідь на появу відповідного субстрату в середовищі. Завдяки такому механізму регуляції бактерії швидко адаптуються до нових ксенобіотиків. Висока швидкість росту та короткий час генерації клітин дають їм змогу оперативно реагувати на дію різних екологічних чинників.

Водночас механізми взаємодії азотофіксувальних бактерій із PFAS та компонентами AFFF залишаються недостатньо вивченими. Сучасні дані свідчать, що більшість мікроорганізмів не здатна до повного руйнування PFAS через високу стабільність фторованих ланцюгів, а спостережувані процеси переважно обмежуються частковою трансформацією прекурсорів або кометаболізмом⁷⁶. Проте висока адаптаційна здатність ґрунтових діазототрофів дає підстави розглядати їх як перспективні об'єкти для дослідження стійкості мікробних угруповань до PFAS та потенційної участі у процесах біоремедіації.

З метою дослідження впливу протипожежних плівкоутворювальних піноутворювачів на нагромадження біомаси бактеріями *A. chroococcum* ВКМ В-1272 культуру вирощували у селективному для *A. chroococcum* середовищі, додаючи піноутворювачі у концентраціях 3 % та 6 %, культивували 2-3 дні, періодично вимірюючи біомасу. Контроль – середовище без піноутворювача. Результати досліджень наведено на рис. 15.

⁷² X Zhang, Y Zhang, S Taniyasu, LWY Yeung, PKS Lam and J Wang, 'Short-chain and long-chain perfluoroalkyl substances: environmental distribution, bioaccumulation and toxicological implications' (2022) 806 *Science of the Total Environment* 150545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150545>.

⁷³ US Environmental Protection Agency (US EPA), 'Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)' (2025) <https://www.epa.gov/pfas>.

⁷⁴ IT Cousins, JC DeWitt, J Glüge, G Goldenman, D Herzke, R Lohmann, M Miller, CA Ng, M Scheringer and Z Wang, 'The high persistence of PFAS is sufficient for their management as a chemical class' (2020) 22 *Environmental Science: Processes & Impacts* 2307–2312 <https://doi.org/10.1039/D0EM00355G>.

⁷⁵ European Environment Agency (EEA), 'PFAS pollution in Europe: current status, risks and policy response' (2024) <https://www.eea.europa.eu>.

⁷⁶ M Shahid and Z Shafi, 'Microbial and molecular approaches for PFAS transformation in soils: prospects and limitations' (2026) 16 *RSC Advances* 4184–4203 <https://doi.org/10.1039/D5RA07508D>.

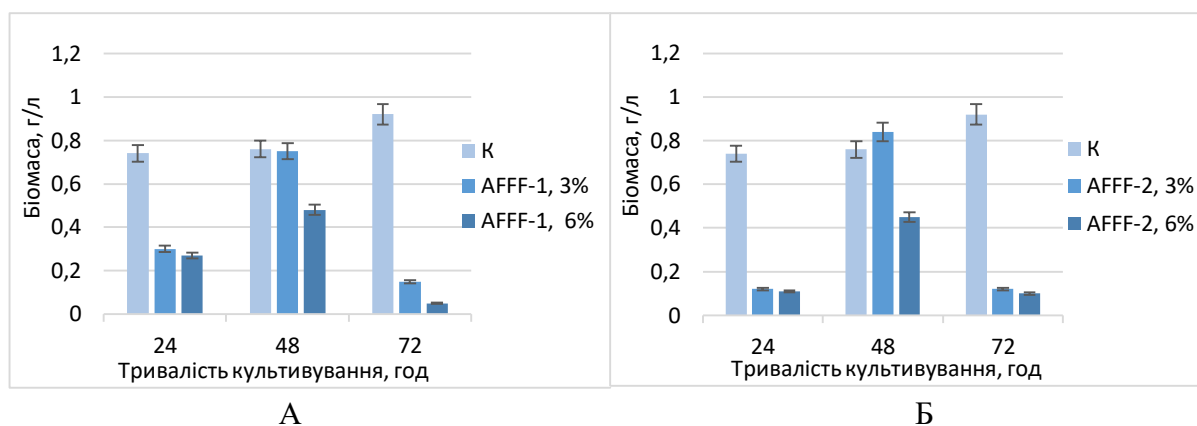


Рисунок 15. Нагромадження біомаси азотофіксувальними бактеріями *Azotobacter chroococcum* BKM B-1272 за впливу флуорсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів AFFF-1 (А) та AFFF-2 (Б)

У ході експерименту виявлено зростання нагромадження біомаси бактеріями *A. chroococcum* BKM B-1272 під час росту у селективному для *A. chroococcum* середовищі без додавання плівкоутворювального піноутворювача. Внесення у середовище росту бактерій плівкоутворювальних піноутворювачів для гасіння пожеж пригнічувало ріст бактерій впродовж першої доби. Упродовж другої доби синтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі за концентрації 3 % вірогідно не впливали на нагромадження біомаси дослідженими бактеріями. За концентрації 6 % спостерігали зниження нагромадження біомаси бактеріями *A. chroococcum* BKM B-1272. Подальше культивування азотофіксувальних бактерій у середовищі з AFFF призвело до зниження нагромадження біомаси *A. chroococcum* BKM B-1272.

Результати диско-дифузійного методу з використанням паперових дисків, імпрегнованих різними концентраціями синтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів типу AFFF, не виявили інгібуювальної дії пін стосовно *A. chroococcum* BKM B-1272, про що свідчила відсутність стерильних зон навколо дисків (рис. 16). Отримані дані не можуть інтерпретуватися як доказ відсутності біологічної активності AFFF, оскільки обмежена дифузія флуорвмісних поверхнево-активних речовин в агарі та їх сорбція матриксом середовища призводять до суттєвого зниження експозиції мікроорганізмів до діючих компонентів, проте можуть свідчити про адаптаційний потенціал бактерій азотофіксувальних бактерій в умовах хімічного забруднення^{58, 77}.

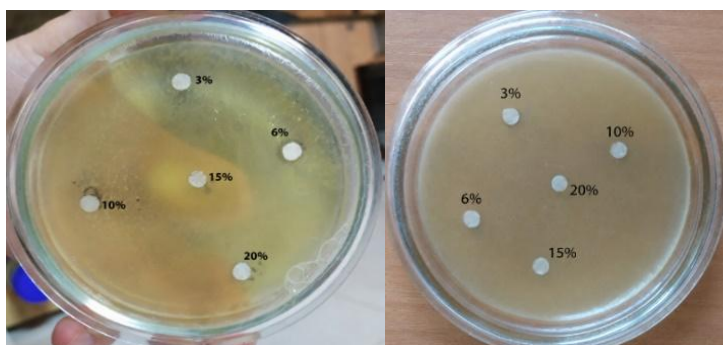


Рисунок 16. Чутливість бактерій *Azotobacter chroococcum* BKM B-1272 до дії плівкоутворювальних піноутворювачів AFFF-1 (А) та AFFF-2 (Б)

⁷⁷ YuO Khanyk, HI Zvir and NM Hrynchyshyn, 'Influence of firefighting fluorosynthetic film forming foam on soil microbocenosis' (2023) 34(2) *Ecology and Noospherology* <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/12576>.

Для дослідження здатності бактерій *A. chroococcum* ВКМ В-1272 використовувати флуорсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі типу AFFF як джерело карбону ми вносили їх у кількості 0,1% (за обсягом) у рідке середовище Раймонда та середовище, селективне для *A. chroococcum* (замість глюкози), культивували упродовж тижня, після чого вимірювали біомасу, а також концентрацію іонів амонію та фторид-іонів потенціометричним методом з використанням іоноселективних кристалічних електродів. (Оскільки перфторовані сполуки, що входять до складу піноутворювачів типу AFFF, важко піддаються біодеструкції, бактеріям необхідний тривалий період адаптації до субстрату). У селективне середовище *A. chroococcum* як джерело карбону замість глюкози вносили флуорсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі як описано вище. Вихідна біомаса становила 0,1 г/л.

Результати досліджень свідчать про те, що бактерії *A. chroococcum* ВКМ В-1272 не здатні до росту у середовищах з додаванням флуорсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів як джерел карбону (рис. 17). Біомаса, нагромаджена бактеріями упродовж 7 діб, достовірно не відрізнялася від вихідної. Незначне зростання біомаси, можливо, пов'язане з наявністю у складі цих пін інших джерел карбону, які додають з метою покращення властивостей засобам піногасіння (для підвищення стабільності, захисту від замерзання, запобігання корозії тощо).

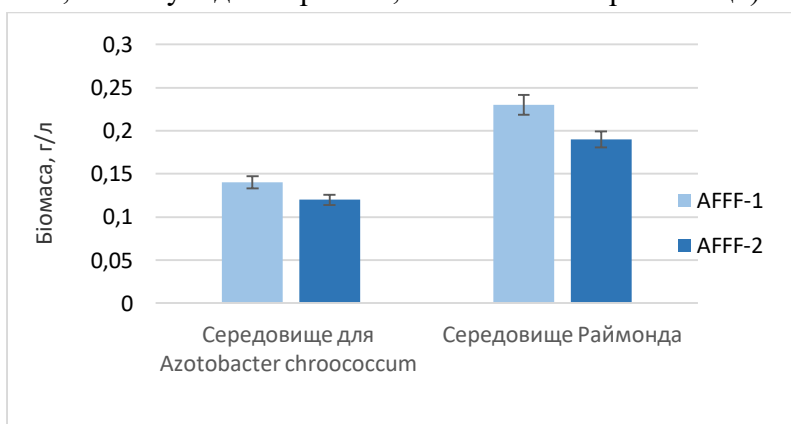


Рисунок 17. Нагромадження біомаси бактеріями *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272 на 7 добу за впливу флуорсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів як джерела карбону

Концентрація іонів амонію у селективному для *A. chroococcum* середовищі на сьому добу росту бактерій *A. chroococcum* ВКМ В-1272 за умови внесення флуорсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів як джерела карбону знизилася порівняно з контролем (середовище без бактерій) від 3,02 до 0,98 ммоль/л у випадку AFFF-1 та від 0,44 до 0,16 ммоль/л у випадку AFFF-2 (рис. 18).

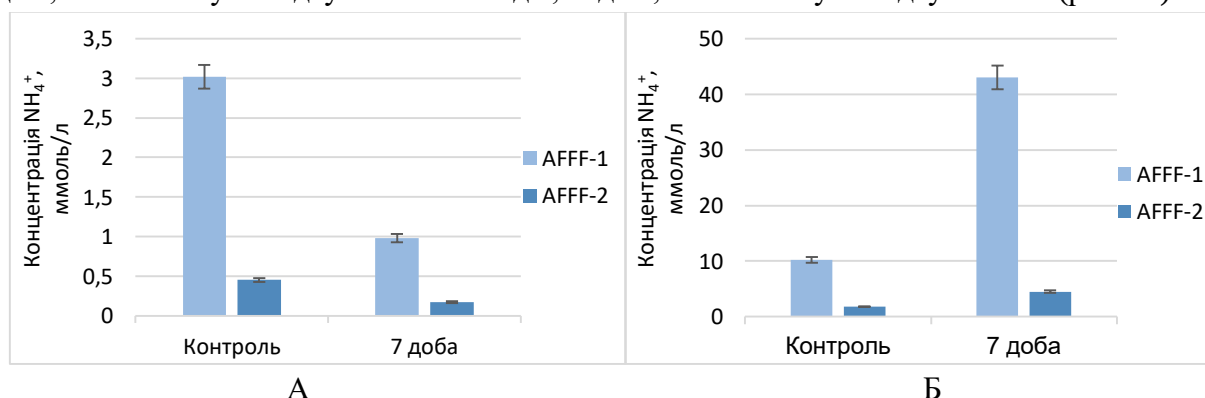


Рисунок 18. Концентрація іонів амонію на сьому добу росту бактерій *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272 за впливу флуорсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів:
А – у середовищі для *Azotobacter chroococcum*; Б – у середовищі Раймонда

Оскільки селективне для *A. chroococcum* середовище не містить сполук нітрогену, припускаємо, що флуорсинтетичні піноутворювачі містять у своєму складі деякі концентрації іонів амонію (амонійні солі підвищують розчинність, стабілізують поверхнево-активні властивості). У середовищі Раймонда, яке містить у своєму складі NH_4Cl (3 г/л), після внесення у нього протипожежних флуорсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів у кількості 0,1 %, вихідна концентрація іонів амонію становила 10,20 та 1,87 ммоль/л відповідно. Після 7 діб культивування спостерігали тенденцію до зростання концентрації іонів амонію у випадку обох протипожежних піноутворювачів. Отримані результати свідчать про необхідність детального аналізу хімічного складу досліджених піноутворювачів, зокрема щодо наявності азотовмісних компонентів. Ймовірно, виявлене підвищення концентрації іонів амонію може бути зумовлене саме внесеними флуорсинтетичними піноутворювачами, а не метаболічною активністю азотфіксувальних бактерій, ріст яких за даних умов був обмеженим.

Флуорсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі містять у своєму складі перфторовані сполуки, яким притаманна висока хімічна стабільність, що робить їх ідеальними матеріалами для широкого застосування. Виняткова стабільність цих сполук бажана з точки зору застосування, але є причиною небезпеки для довкілля. Перфторовані сполуки дуже важко піддаються біодеструкції, тому розщеплення їх мікроорганізмами має важливе екологічне значення.

З метою дослідження здатності бактерій *A. chroococcum* ВКМ В-1272 до біодеградації флуорсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів визначали концентрацію фторид-іонів у культуральному середовищі як один із можливих індикаторів трансформації флуорвмісних компонентів піноутворювачів. Результати досліджень наведено на рис. 19.

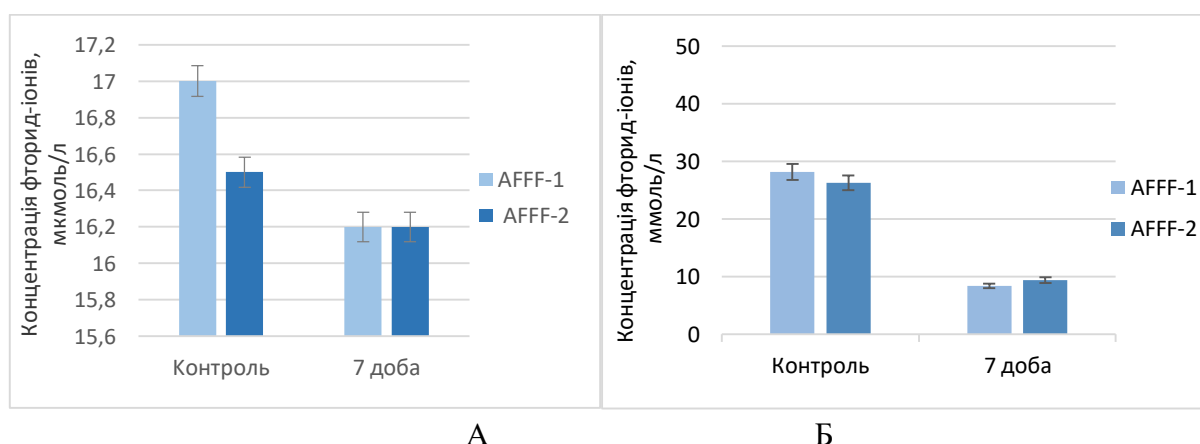


Рисунок 19. Концентрація фторид-іонів на сьому добу росту бактерій *Azotobacter chroococcum* ВКМ В-1272 за впливу флуорсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів: А – у селективному для *Azotobacter chroococcum* середовищі; Б – у середовищі Раймонда

Отримані результати узгоджуються з відомими даними щодо високої хімічної та біологічної стійкості флуорвмісних органічних сполук, зокрема компонентів синтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів. Наявність міцного зв'язку C–F у пер- та поліфторалкільних сполук значно ускладнює їх ферментативне розщеплення, оскільки відсутні специфічні ферментні системи, здатні ініціювати ефективне мікробне дефторування. У зв'язку з цим відсутність зміни концентрації фторид-іонів у культуральному середовищі свідчить не лише про відсутність

біодеградації досліджених піноутворювачів штамом *A. chroococcum* ВКМ В-1272, але й про загальну низьку біодоступність та хімічну інертність цих сполук.

ВИСНОВКИ

Вплив досліджених ксенобіотиків на бактерії роду *Azotobacter* має комплексний характер і визначається хімічною природою діючих речовин та компонентним складом препаратів. Встановлено, що гербіцид Раундап, фунгіцид Квадріс, інсектицид Антигусінь, а також флуорсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі типу AFFF по-різному впливають на нагромадження біомаси та інтенсивність процесів діазотрофії, що підтверджує високу чутливість азотофіксувальних мікроорганізмів до хімічного навантаження ґрунтового середовища. Встановлено, що виявлені ефекти можуть бути зумовлені не лише дією активних інгредієнтів препаратів, але й впливом допоміжних компонентів, зокрема поверхнево-активних речовин, стабілізаторів. Такі сполуки здатні модифікувати проникність клітинних мембран, порушувати ферментативну активність та впливати на функціонування ключових метаболічних систем, включаючи нітрогеназний комплекс, що підкреслює необхідність врахування повного хімічного складу препаратів під час оцінювання їх екотоксикологічного впливу.

Водночас представники роду *Azotobacter* зберігають здатність до виживання та часткової функціональної активності навіть за умов повторного хімічного забруднення, що свідчить про їх адаптаційний потенціал до антропогенно змінених ґрунтових екосистем. Поєднання високої толерантності бактерій роду *Azotobacter* до дії пестицидів із здатністю до участі у трансформації окремих ксенобіотиків визначає їх як важливий функціональний компонент стабілізації ґрунтових екосистем. У забруднених агроценозах ці бактерії забезпечують підтримання базових мікробіологічних процесів навіть за умов хімічного стресу, що свідчить про їхнє значення у збереженні функціональної стійкості ґрунтової біоти і визначає перспективність їх використання як модельних організмів для біомоніторингу та як потенційних агентів біоремедіації агроекосистем, забруднених ксенобіотиками.

ЗАХВОРЮВАНІСТЬ НА РАК ШИЙКИ МАТКИ У ЛЬВІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ ЗА ПЕРІОД 2020 – 2024 рр.

CERVICAL CANCER INCIDENCE IN LVIV REGION FOR THE PERIOD 2020 – 2024

Іванченко Наталія Олександрівна, генеральний директор ДУ "Львівський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України", <https://orcid.org/0000-0002-0112-6962>

Сергієнко Вікторія Олександрівна, доктор медичних наук, професор кафедри ендокринології, проректор з наукової роботи, Державне некомерційне товариство "Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького", serhiyenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6414-0956>

Кунинець Оксана Юліанівна, завідувач відділу епіднадзора і профілактики неінфекційних хвороб, ДУ "Львівський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України", kou_1107@ukr.net

Литвин Галина Орестівна, доцент, к. м. н., головний позаштатний експерт з дитячих інфекційних хвороб ДООЗ ЛОДА, доцент кафедри дитячих інфекційних хвороб ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького», golytvyn2012@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6902-1024>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.12>

Анотація. Вірус папіломи людини (ВПЛ, HPV) – це група вірусів, що переважно передається статевим шляхом. Існує понад 200 різних штамів вірусу папіломи людини. Впродовж життя ВПЛ інфікується щонайменше троє з чотирьох людей¹. Найчастіше інфікування відбувається до початку статевого життя. У 90% інфікованих імунна система пригнічує ВПЛ впродовж 2 років після інфікування. В частини пацієнтів інфікування ВПЛ сприяє розвитку злоякісних новоутворень: раку шийки матки, раку статевого члена, раку аноректальної ділянки, раку ротоглотки². Два типи ВПЛ (16 та 18) спричиняють 70% випадків раку і передракових уражень шийки матки³. За результатами аналізу захворюваності на рак шийки матки за період 2020 – 2024 рр., проведений згідно бази даних електронної системи охорони здоров'я (ЕСОЗ), середній показник захворюваності у Львівській області на рак шийки матки (РШМ) становить 2,30 випадків на 1000 задекларованих жінок. Показники вище середньообласного рівня реєструються у 5 районах. Нижчі за середньообласний показник у Львівському районі – 1,93 на 1000 задекларованих жінок, та Самбірському районі – 2,03 на 1000 задекларованих жінок. Також проаналізована захворюваність на рак шийки матки в розрізі громад. Цей аналіз дає можливість приймати управлінські рішення щодо профілактичних обстежень та скринінгів на вірус папіломи людини, а також запровадження вакцинації для найбільш вразливих груп населення.

Ключові слова: вірус папіломи людини, рак шийки матки, захворюваність, ПЛР, вакцинація.

¹ Sung H, Ferlay J, Siegel RL, et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin.* 2021;71:209-249.2

² Leath CA, Monk BJ. Twenty-first century cervical cancer management: a historical perspective of the gynecologic oncology group/ NRG oncology over the past twenty years. *Gynecol Oncol.* 2018;150:391-397.3.

³ Olusola P, Banerjee HN, Philley JV, Dasgupta S. Human papilloma virus-associated cervical cancer and health disparities. *Cells.* 2019;8:622.4

Abstract. Human papillomavirus (HPV) is a group of viruses that are primarily transmitted sexually among both men and women. There are over 200 different strains of human papillomavirus. During their lifetime, at least three out of four people are infected with HPV. Infection most often occurs before sexual activity begins. In 90% of infected individuals, the immune system suppresses HPV within 2 years of infection. In some patients, HPV infection contributes to the development of malignant neoplasms: such as cervical cancer, penile cancer, anal cancer, and oropharyngeal cancer. Two types of HPV (16 and 18) cause 70% of cervical cancer and precancerous lesions. According to the analysis of cervical cancer incidence for the period 2020–2024, conducted based on the electronic healthcare system database (EHIS), the average incidence rate of cervical cancer (CC) in Lviv region is 2.30 cases per 1000 registered women. Rates above the regional average are registered in 5 districts. Lower than the regional average rates are observed in Lviv district – 1.93 per 1000 registered women, and Sambir district – 2.03 per 1000 registered women. Cervical cancer incidence by communities has also been analyzed. This analysis allows for management decisions regarding preventive examinations and screenings for human papillomavirus, as well as the implementation of vaccination for the most vulnerable population groups.

Keywords: human papillomavirus, cervical cancer, incidence, PCR, vaccination.

АКТУАЛЬНІСТЬ

У 2020 році у світі було зареєстровано приблизно 604 000 нових випадків раку шийки матки (РШМ). Рівень захворюваності на нові пухлини становив 6,5%, поступаючи лише раку молочної залози, колоректального раку та раку легень. У 2020 році померло 342 000 пацієнток з РШМ⁴. Смертність 7,7% і рак шийки матки є четвертою провідною причиною смерті від раку у жінок. Незважаючи на початок первинної профілактики за допомогою вакцинації та вторинної профілактики за допомогою скринінгу раку, рак шийки матки залишається провідною причиною смерті серед жінок з раком у всьому світі.

Персистуюча інфекція вірусом папіломи людини високого ризику (ВПЛ) є фактором ризику розвитку РШМ, причому типи 16 та 18 становлять близько 70% усіх випадків РШМ, спричинених ВПЛ. Вірус папіломи людини – це безоболонковий, дволанцюговий кільцевий ДНК-вірус, який інфікує епітеліальні клітини⁵.

Згідно з даними Національного канцер-реєстру, в Україні реєструється близько 3 тис. злоякісних новоутворень шийки матки щорічно. Зокрема, у 2023 р. загальна кількість уперше зареєстрованих випадків захворювання на рак шийки матки становила 2962 випадки. Від загальної кількості хворих на РШМ померло 1075 жінок.

РШМ — один із найагресивніших видів раку. Водночас запобігти цій недугі можна, вакцинувавшись проти вірусу папіломи людини (ВПЛ) і регулярно проходячи профілактичні скринінги та огляди⁶. Для створення ефективної системи боротьби з РШМ в Україні з 1 січня 2025 р. впроваджено порядок проведення скринінгу та ранньої діагностики.

Відтепер в Україні запроваджується комплексна система профілактики цього захворювання, яка базується на сучасних наукових підходах і рекомендаціях Всесвітньої організації охорони

⁴ Wagner J, Rapsomaniki MA, Chevrier S, et al. A single-cell atlas of the tumor and immune ecosystem of human breast cancer. *Cell*. 2019;177:1330-1345.e18.5

⁵ Olalekan S, Xie B, Back R, Eckart H, Basu A. Characterizing the tumor microenvironment of metastatic ovarian cancer by single-cell transcriptomics. *Cell Rep*. 2021;35:109165

⁶ Di Donato V, Caruso G, Petrillo M, Kontopantelis E, Palaia I, Perniola G, et al. Adjuvant HPV vaccination to prevent recurrent cervical dysplasia after surgical treatment: a meta-analysis. *Vaccines* 2021;9(5):1-16. DOI: 10.3390/vaccines9050410

здоров'я (ВООЗ)⁷. Ця програма дозволить своєчасно виявляти передракові стани серед жінок в Україні та знизити захворюваність на РШМ.

З 1 січня 2025 р. скринінг на РШМ належить до переліку медичних послуг, які забезпечуються надавачами первинної медичної допомоги (ПМД), і проводиться за чітко визначеним алгоритмом.

Система скринінгу та ранньої діагностики передбачає проведення первинної та вторинної профілактики.

Первинна профілактика спрямована на запобігання РШМ і передбачає опитування кожні 5 років з метою виявлення факторів ризику та симптомів РШМ серед жінок 21–35 років під час візиту до лікаря.

У разі виявлення факторів ризику жінці надаватиметься скерування на тестування (ПАП-тест (Папаніколау) або ПЛР-тест (полімеразна ланцюгова реакція)).

Заходи вторинної профілактики РШМ передбачають обов'язкове тестування з використанням ПАП- або ПЛР-тесту: для жінок віком від 30–35 років і до 55 років — 1 раз на 10 років; для жінок від 25 років, які живуть з (ВІЛ/СНІД), — 1 раз на 5 років. Для жінок віком 21–35 років, у яких виявлені фактори ризику або симптоми – обстеження проводять негайно.

У разі позитивних результатів тестів пацієнтку скеровують до лікаря-онколога для подальшої діагностики та лікування. Практично всі випадки РШМ (99%) спричинені ВПЛ, який поширюється переважно під час статевого контакту. Існують понад 100 його типів, 12 із яких належать до ВПЛ високого онкогенного ризику. Вірус може призвести до аномальних змін у клітинах шийки матки, що, зі свого боку, може спричинити розвиток новоутворень.

Від ВПЛ захищають три вакцини:

- дев'ятивалентна вакцина проти вірусу папіломи людини (9vHPV), яка захищає від ВПЛ типів 6 і 11 (що викликають > 90 % видимих генітальних бородавок), типів 16 і 18 (що викликають приблизно 70 % випадків раку шийки матки та 90 % випадків раку заднього проходу) і типів 31, 33, 45, 52 і 58 (які разом викликають 10-20 % випадків раку шийки матки)⁸;
- чотиривалентна вакцина (4vHPV) проти вірусу папіломи людини, яка захищає від типів 6, 11, 16 і 18⁹;
- двовалентна вакцина (2vHPV) проти вірусу папіломи людини, яка захищає від типів 16 і 18¹⁰.

У Сполучених Штатах Америки доступна лише 9-валентна вакцина.

Для вироблення вакцин проти ВПЛ з головного капсидного (L1) білка ВПЛ використовується технологія рекомбінантної ДНК. Білки L1 самостійно збираються у неінфекційні неонкогенні вірусоподібні частинки (VLP).

З 1 січня 2026 року вакцинація проти вірусу папіломи людини в Україні стала безоплатною для дівчаток віком від 12 до 13 років 11 місяців та 29 днів з використанням одноступінчастої схеми вакцинації дев'ятивалентною вакциною. За кошти фізичних та юридичних осіб можуть бути вакциновані хлопчики і дівчата інших вікових груп, починаючи з 9 років.

⁷ Zarochentseva NV, Dzhydzhikhiya LK, Nabieva VN. Effectiveness of HPV vaccination in preventing recurrent cervical intraepithelial neoplasia after excisional treatment. *Voprosy Ginekologii, Akusherstva I Perinatologii* 2021;20(4):38-44. DOI: 10.20953/1726-1678-2021-4-38-44

⁸ NCT03979014. Nonavalent prophylactic HPV vaccine (GARDASIL9) after local conservative the NOVEL trial (NOVEL) (NCT123456). <https://clinicaltrials.gov/study/NCT03979014> (accessed 11 September 2023)

⁹ European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC). Human papillomavirus infection: recommended vaccinations. <https://vaccine-schedule.ecdc.europa.eu/Scheduler/ByDisease?SelectedDiseaseId=38&SelectedCountryIdByDisease=-1> (accessed 27 November 2023)

¹⁰ Han L, Zhang B. Can prophylactic HPV vaccination reduce the recurrence of cervical lesions after surgery? Review and prospect. *Infectious Agents and Cancer* 2023;18(1):66. DOI: 10.1186/s13027-023-00547-2

МЕТА

Метою роботи було проаналізувати захворюваність на рак шийки матки на рівні громад Львівської області та визначити необхідні заходи реагування.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Проаналізовано базу даних національної служби здоров'я України – електронна система охорони здоров'я за 2020 - 2024 роки в розрізі надавачів медичних послуг Львівщини. Показники розраховувались на 1 тисячу задекларованих осіб.

РЕЗУЛЬТАТИ

Середній показник по Львівській області захворюваності на рак шийки матки (РШМ) становить 2,30 випадків на 1000 задекларованих жінок. Показники вище середньообласного рівня реєструються у 5 районах:

- Шептицький район – 3,23 на 1000 задекларованих жінок (найвищий показник серед районів);

- Стрийський район – 2,81 на 1000 задекларованих жінок;
- Яворівський район – 2,66 на 1000 задекларованих жінок;
- Дрогобицький район – 2,64 на 1000 задекларованих жінок;
- Золочівський район – 2,53 на 1000 задекларованих жінок.

Нижчі за середньообласний показник:

- Львівський район – 1,93 на 1000 задекларованих жінок;
- Самбірський район – 2,03 на 1000 задекларованих жінок.

Особливістю Львівського району є те, що при найбільшій кількості жіночого населення рівень раку шийки матки залишається найнижчим, що може свідчити про доступність скринінгу, належну організацію профілактичної роботи або регулярне звернення жінок для профілактичних оглядів.

Основна група ризику, на яку припадає 64% раку шийки матки – це вік 40–64 роки.

Найвища питома вага у цій віковій категорії раку шийки матки спостерігається у таких громадах:

- 100% - Мурованська, Сокільницька, Щирецька, Гніздичівська;
- 93,75% - Судовишнянська;
- 87,5% - Славська;
- 80,0% - Меденицька, Жовтанецька, Хирівська;
- 77,78% - Солонківська;
- 76,92% - Рудківська;
- 76,32% - Жидачівська;
- 76,19% - Белзька;
- 75,68% - Рава-Руська;
- 75,0% - Дрогобицька, Заболотцівська, Давидівська, Оброшинська, Козівська, Сколівська,

Лопатинська;

- 72,86% - Золочівська;
- 71,43% - Стрілківська, Ходорівська;
- 67,86% - Старосамбірська;
- 67,44% - Бродівська;
- 66,67% - Підкамінська, Добросинсько-Магерівська, Боринська, Турківська;

- 66,07% - Мостиська;
- 65,63 % - Городоцька;
- 65,52% - Куликівська;
- 64,44% - Жовківська;
- 64,29% - Новояворівська;
- 64,0% - Івано-Франківська.

Висока частка випадків у цій віковій групі підтверджує необхідність регулярного скринінгу саме для жінок вікової групи 40–64 років, що відповідає загальним епідеміологічним тенденціям та підвищеному ризику розвитку раку шийки матки у цьому віці.

На другому місці за частотою виявлення раку шийки матки вікова група 65+ років (30,7%)

Найвища питома вага у цій віковій структурі спостерігається у таких громадах:

- 100% - Тростянецька;
- 62,5% - Грабовецько-Дулібівська;
- 55,56% - Ралівська.

Такі показники можуть бути наслідком недостатнього скринінгу в минулі роки або пізнього звернення.

Найнижча частка виявлених хворих на рак шийки матки у віковій структурі 18–39 років – 5,3%.

Частка випадків у молодшій віковій категорії загалом невелика, але в окремих громадах показники значно перевищують середні:

- 25% - Великолюбінська, Оброшинська;
- 22,22% - Розвадівська;
- 18,18% - Комарнівська;
- 14,29% - Підберізіцівська;
- 13,04% - Моршинська;
- 12,5% - Східницька, Новокалінівська, Славська;
- 12,12% - Кам'янка-Бузька;
- 11,11% - Добротвірська;
- 10,53% - Новояричівська;
- 10,0% - Меденицька, Жовтанецька.

Хоча абсолютна кількість випадків у цій групі невелика, підвищена частка може свідчити про раннє інфікування вірусом папіломи людини та необхідність посилення заходів щодо вакцинації дівчат.

Аналізуючи захворюваність на рак шийки матки в розрізі районів і громад одержано такі результати:

- Шептицький (3,23 випадків на 1000 декларантів) – найвищий рівень серед усіх районів Львівської області. Вищі за середньорайонний показник випадків на 1000 декларантів у громадах: Белзька – 4,78, Добротвірська – 3,82, Сокальська – 3,65, Радехівська – 3,29, Шептицька – 3,29;

- Стрийський (2,81 випадків на 1000 декларантів) – вищі за середньорайонний показник в громадах Журавненська – 5,61%, Моршинська – 4,11%, Жидачівська – 3,80%, Грабовецько-Дулібівська – 3,06;

- Яворівський (2,66 випадків на 1000 декларантів) – вищі за середньорайонний показник в Шегинівській – 4,49, Мостиській – 4,22, Івано-Франківській – 2,83;

- Дрогобицький (2,64 випадків на 1000 декларантів) – вищі за середньорайонний показник в громадах Східницька (3,78), Трускавецька (3,28), Дрогобицька (2,69);
- Золочівський (2,53 випадків на 1000 декларантів) – вищі за середньорайонний показник в громадах Поморянська (3,72), Буська (3,56), Золочівська (2,73);
- Самбірський (2,03 випадків на 1000 декларантів) – вищі за середньорайонний показник в громадах Хирівська – 2,78, Старосамбірська – 2,72, Рудківська – 2,58, Самбірська – 2,10;
- Львівський (1,93 випадків на 1000 декларантів) – загальний показник випадків на 1000 декларантів жіночої статі найнижчий, але найвищі показники в громадах: Куликівська – 5,00, Бібрська – 3,98, Перемишлянська – 3,82, Добросинсько-Магерівська – 3,37, Кам'янка-Бузька – 3,05, Рава-Руська – 2,95, Жовківська та Жовтанецька – по 2,32, Підберіздівська – 2,24, Новояричівська – 2,18, Пустомитівська – 2,06.

Враховуючи відсутність даних в системі про проведення скринінгових обстежень відповідно до Порядку скринінгу і ранньої діагностики раку шийки матки та моніторингу стану здоров'я пацієнток з груп ризику, затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України 05 серпня 2024 року № 1368, проведено аналіз рівня захворюваності на незапальні захворювання жіночих статевих органів (N 82, N 84, N 86 - N90), з метою з'ясування кореляції між зверненням жінок за медичною допомогою з приводу різноманітних захворювань запального генезу, своєчасним лікуванням та профілактичними заходами, враховуючи що запальні патології включають дисплазії та інші стани, які часто можуть виникати від інфікування вірусом папіломи людини (ВПЛ) високого онкогенного ризику, що є причиною (понад 99%) для розвитку раку шийки матки.

Якщо аналізувати запальні захворювання жіночих статевих органів (N 82, N 84, N 86, N 87, N 88, N 89, N90 згідно МКХ – 10, то середній показник по області становить 43,06 на 1000 декларантів жінок.

Найвищий показник випадків запальних захворювань жіночих статевих органів на 1000 декларантів жінок – у Львівському районі (48,43 на 1000 декларантів жінок).

Можна припустити про співвідношення між більшою частотою звернень за медичною допомогою з приводу запальних захворювань жіночих статевих органів у Львівському районі та найнижчим показником випадків (1,93 випадків на 1000 декларантів) на 1000 декларантів жіночої статі.

У Золочівському районі показник випадків запальних захворювань жіночих статевих органів 31,3 на 1000 декларантів жінок (найнижчий показник в області), а показник випадків РШМ (С-53) на 1000 задекларованих жінок – 2,53 (вищий від середньообласного).

У Шептицькому районі, де показник випадків РШМ (С-53) на 1000 задекларованих жінок становить – 3,23 (найвищий в області), показник випадків запальних захворювань жіночих статевих органів – 42,3 на 1000 декларантів жінок (дещо нижче від середнього по області).

З 1 січня 2026 року у Львівській області розпочато вакцинацію проти вірусу папіломи людини дівчат віком від 12 до 13 років 11 місяців та 29 днів. У Львівській області логістику вакцин забезпечує Центр контролю та профілактики хвороб, який оснащений належним обладнанням для збереження вакцин при температурі від 2 до 8 градусів. Машинами-рефрижераторами вакцина розвозиться у заклади охорони здоров'я, які проводять вакцинацію. У всіх закладах первинної медичної допомоги є умови для зберігання вакцин. Впродовж 2025 року Центр контролю та профілактики хвороб провів 45 навчань для лікарів з питань змін до Календаря профілактичних щеплень та впровадження вакцинації проти вірусу папіломи людини. На Львівщині активно розпочалася вакцинація проти вірусу папіломи людини безоплатно для дівчат віком 12-13 років. За кошти обласного бюджету можуть вакцинуватися дівчата віком 14 років на базі Львівського

обласного перинатального центру. Проблемними питаннями залишаються відмови через релігійні переконання. Відмови через упередженість до вакцинації загалом. За період 2018–2024 рр. у Львівській області вакцинація проти ВПЛ проводилась за кошти обласного бюджету в межах Комплексної програми підтримки галузі охорони здоров'я (рис.1).

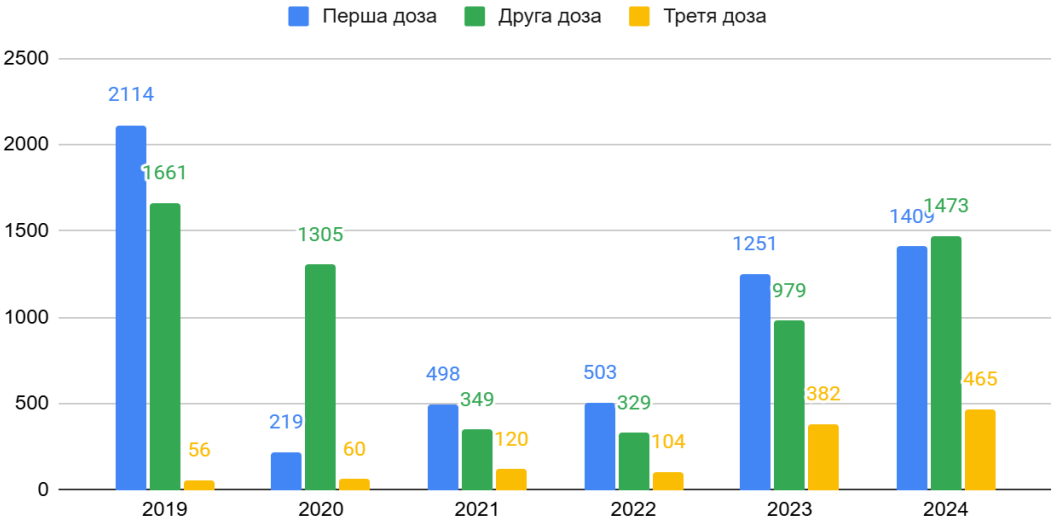


Рисунок 1. Кількість проведених щеплень проти ВПЛ у Львівській області, відповідно до даних Укрвак-08

ВИСНОВКИ

1. Найвищу захворюваність на рак шийки матки зареєстровано у Шептицькому, Стрийському, Яворівському, Дрогобицькому та Золочівському районах. У розрізі громад (вибрано 10 з найбільшими показниками на 1000 задекларованих жінок) найвищий рівень реєструється в громадах різних районів (Львівський, Стрийський, Шептицький, Яворівський) (табл. 1).

Таблиця 1

Перелік громад з найвищим рівнем захворюваності на РШМ

Стрийський	Журавненська	5,61
Львівський	Куликівська	5,00
Шептицький	Белзька	4,78
Яворівський	Шегинівська	4,49
Яворівський	Мостиська	4,22
Стрийський	Моршинська	4,11
Львівський	Бібрська	3,98
Шептицький	Добротвірська	3,82
Львівський	Перемишлянська	3,82
Стрийський	Жидачівська	3,80

2. Найбільша частка випадків припадає на вікову групу 40-64 років, тому саме на цю категорію потрібно спрямовувати активні скринінгові програми.

3. Громади з високими показниками (понад 2,3 на 1000 жінок-декларантів) потребують пріоритетних заходів: додаткових скринінгів, комунікаційних кампаній щодо вакцинації проти вірусу папіломи людини.

4. Львівський район, незважаючи на найчисельніше жіноче населення, має найнижчу частку захворюваності на рак шийки матки, що може свідчити про ефективний скринінг та належну організацію профілактичної роботи. Однак, відсутність даних в системі про проведення скринінгових обстежень, відповідно до Порядку скринінгу і ранньої діагностики раку шийки матки та моніторингу стану здоров'я пацієнток з груп ризику, затвердженого наказом Міністерства охорони здоров'я України 05 серпня 2024 року № 1368 «Про забезпечення скринінгу і ранньої діагностики окремих видів раку та моніторингу стану здоров'я пацієнтів з груп ризику», не дозволяє чітко стверджувати про те, що низькі рівні захворюваності у громадах з такими показниками відповідають високому рівню скринінгу.

5. Запровадження безоплатної вакцинації проти вірусу папіломи людини дівчат віком від 12 до 13 років 11 місяців 29 днів (до початку статевого життя) дозволить знизити поширення захворюваності на рак шийки матки серед мешканок Львівщини.

ПІДСУМКИ ЕПІДЕМІЧНОГО СЕЗОНУ ЗАХВОРЮВАНOSTІ НА ГРИП ТА ГРВІ 2025-2026 РОКІВ

SUMMARY OF THE 2025–2026 FLU AND SARS SEASON

Іванченко Наталія Олександрівна, генеральний директор ДУ "Львівський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України", <https://orcid.org/0000-0002-0112-6962>

Сергієнко Вікторія Олександрівна, доктор медичних наук, професор кафедри ендокринології, проректор з наукової роботи, Державне некомерційне товариство "Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького", serhiyenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6414-0956>

Цепак Діана Миколаївна, лікар-епідеміолог відділу епідеміологічного нагляду та профілактики інфекційних хвороб, ДУ "Львівський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України", pivkach.diana080919@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9489-4250>

Литвин Галина Орестівна, доцент, кандидат медичних наук, головний позаштатний експерт з дитячих інфекційних хвороб ДООЗ ЛОДА, доцент кафедри дитячих інфекційних хвороб ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького», golytvyn2012@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6902-1024>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.13>

Анотація. Грип та гострі респіраторні вірусні інфекції становлять найбільшу частку в структурі інфекційної захворюваності. Щотижневий моніторинг забезпечує проведення своєчасного аналізу із вжиттям належних профілактичних та протиепідемічних заходів. Епіднагляд поділяється на дозорний та рутинний. У Львівській області в дозорному епіднагляді залучені КНП ЛОР «Львівська обласна інфекційна клінічна лікарня» та 2 міська комунальна поліклініка міста Львова. За результатами епіднагляду встановлено, що з 29 вересня 2025 до 17 травня 2026 року) на ГРВІ перехворіли 323 207 осіб (13,2% від населення області), з них 151 269 (46,8%) дітей. За звітний період на стаціонарному лікуванні з приводу грипу та ГРВІ перебувало 5 235 пацієнтів, з них 2 402 дітей (45,9%). Серед усіх осіб, що перебували на стаціонарному лікуванні з приводу грипу та ГРВІ частка пацієнтів із COVID-19 становила 5,1%. З початку поточного епідемічного сезону зареєстровано 21 летальний випадок від грипу типу А, 2 летальних випадки серед пацієнтів із позитивним результатом тесту на COVID-19, 1 летальний випадок від аденовірусу, 1 від РС-вірусу та 1 від метапневмовірусу. З початку епідемічного сезону 2025 – 2026 проти грипу вакциновано 11 030 осіб, з них 4 205 (38,1%) – з груп медичного та епідемічного ризику.

Ключові слова: грип, гострі респіраторні вірусні інфекції, вакцинація, аденовірус, метапневмовірус.

Abstract. Influenza and acute respiratory viral infections make up the largest share in the structure of infectious morbidity. Weekly monitoring ensures timely analysis with the adoption of appropriate preventive and anti-epidemic measures. Epidemiological surveillance is divided into sentinel and routine. In the Lviv region, the KNP ENT "Lviv Regional Infectious Clinical Hospital" and the 2nd city municipal

polyclinic of the city of Lviv are involved in sentinel epidemiological surveillance. According to the results of the epidemiological surveillance, it was found that from September 29, 2025 to May 17, 2026) 323,207 people (13.2% of the population of the region) fell ill with SARS, of which 151,269 (46.8%) were children. During the reporting period, 5,235 patients were hospitalized for influenza and SARS, of which 2,402 were children (45.9%). Among all persons hospitalized for influenza and SARS, the proportion of patients with COVID-19 was 5.1%. Since the beginning of the current epidemic season, 21 deaths from influenza type A have been registered, 2 deaths among patients with a positive COVID-19 test result, 1 death from adenovirus, 1 from RSV, and 1 from metapneumovirus. Since the beginning of the 2025-2026 epidemic season, 11,030 people have been vaccinated against influenza, of which 4,205 (38.1%) were from medical and epidemic risk groups.

Keywords: influenza, acute respiratory viral infections, vaccination, adenovirus, metapneumovirus.

АКТУАЛЬНІСТЬ

Епіднагляд є основою для аналізу даних та прийняття управлінських рішень. Відповідно до наказу МОЗ України від 17 травня 2019 року № 1126, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 07 червня 2019 року за № 595/33566 «Про затвердження Порядку організації проведення епідеміологічного нагляду за грипом та гострими респіраторними вірусними інфекціями, заходів з готовності в міжепідемічний період і реагування під час епідемічного сезону захворюваності на грип та ГРВІ», епідемічний сезон захворюваності на грип та ГРВІ - період часу, протягом якого існує найбільша вірогідність підйому захворюваності на ГРВІ, розрахований на підставі багаторічних спостережень та триває з 40 тижня поточного року по 20 тиждень наступного року. Міжепідемічний період – період часу, протягом якого захворюваність на ГРВІ тримається на рівні або нижчою від епідемічного порога та триває з 21 по 39 тиждень поточного року. Рутинний епідеміологічний нагляд за ГРВІ – діяльність закладів охорони здоров'я та закладів громадського здоров'я щодо реєстрації та повідомлення про випадки ГРВІ. Особа, відповідальна за здійснення рутинного епіднагляду, має напередодні кожного сезону визначати епідемічний поріг захворюваності на ГРВІ в регіоні МЕМ-методом згідно з Алгоритмом розрахунку епідемічних порогів захворюваності на грип та ГРВІ МЕМ-методом¹.

На кожен лабораторно підтверджений випадок смерті від грипу та ГРВІ заклади охорони здоров'я усіх форм власності та відомчої підпорядкованості мають надіслати до Центрів контролю та профілактики хвороб індивідуальну звітну форму «Форма обліку клінічних даних та зразків матеріалів, відібраних від пацієнта, який помер, у закладах охорони здоров'я усіх форм власності та відомчої підпорядкованості».

Дозорний епіднагляд за грипом – система отримання, аналізу та інтерпретації надійних даних із визначеного числа закладів охорони здоров'я. Грипоподібне захворювання (ГПЗ) – гостре респіраторне захворювання, що виникло протягом попередніх 10 календарних днів із підвищенням температури тіла до $\geq 38^{\circ}\text{C}$ та кашлем. Лише пацієнт, який відповідає всім трьом критеріям випадку ГПЗ, може бути розглянутий як випадок ГПЗ із відповідним подальшим відбором в пацієнта зразку матеріалу на лабораторне дослідження та звітуванням.

Критерії випадку:

¹ Наказ МОЗ України від 17 травня 2019 року № 1126, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 07 червня 2019 року за № 595/33566 «Про затвердження Порядку організації проведення епідеміологічного нагляду за грипом та гострими респіраторними вірусними інфекціями, заходів з готовності в міжепідемічний період і реагування під час епідемічного сезону захворюваності на грип та ГРВІ»

1. Підвищення температури тіла 38 С і вище;
2. Кашель;
3. Початок хвороби протягом попередніх 10 календарних днів.

З метою обліку пацієнтів з ГПЗ, що звернулись за звітний тиждень, дозорним лікарям пропонується використовувати журнали реєстрації таких пацієнтів. Це полегшить облік та реєстрацію пацієнтів з ГПЗ та допоможе уникнути «втрати» випадків ГПЗ. Відбір зразків здійснюється від перших трьох пацієнтів із ГПЗ, що звернулися протягом понеділка та вівторка, кожним дозорним лікарем.

Тяжка гостра респіраторна інфекція – гостре респіраторне захворювання, яке характеризується підвищенням температури тіла до 38 С і вище в анамнезі чи під час термометрії, кашлем, початком протягом попередніх 10 календарних днів та потребує госпіталізації.

Лише пацієнт, який відповідає всім чотирьом критеріям випадку ТГРІ може бути розглянутий як випадок ТГРІ із відповідним подальшим відбором в пацієнта зразку матеріалу на лабораторне дослідження та звітуванням.

Критерії випадку:

1. Підвищення температури тіла 38 С і вище в анамнезі чи під час термометрії;
2. Кашель;
3. Початок хвороби протягом попередніх 10 календарних днів;
4. Потреба в госпіталізації (на більш ніж 24 години).

МЕТА

Метою дослідження було проаналізувати захворюваність на грип та ГРВІ у Львівській області в епідсезоні 2025 – 2026 років.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Проаналізовано щотижневі звітні форми щодо дозорного та рутинного епіднагляду у Львівській області, повідомлення про летальні випадки та опрацьовано медичні інформаційні системи.

РЕЗУЛЬТАТИ

Від початку епідсезону 29 вересня 2025 року до завершення 17 травня 2026 року на ГРВІ в Україні перехворіло 4 236 118 людей (з них — 2 390 625 дітей, 56,43 % від загальної кількості). На COVID-19 захворіло 22 121 людини (3 705 дітей, 16,75 %).

Упродовж епідсезону до лікарень із ГРВІ було госпіталізовано 119 799 людей (67 490 дітей, 56,34 %), з COVID-19 – 6 581 (901 дитину, 13,69 %). Унаслідок ГРВІ померли 199 людей, у їх числі 12 дітей.

Щеплення проти грипу в Україні отримали 78 904 людини, з яких 44 582 – з груп медичного та епідемічного ризиків. Найбільше вакцинованих – серед працівників медичних закладів – 20 375.

Епідеміологи покладаються на статистичні підходи для оцінки параметрів, що цікавлять, таких як поширеність впливу або захворюваність. Функції впливу – це потужна статистична концепція, яка може бути використана для розробки та застосування кількісних методів в епідеміології та в ширшому застосуванні.

У Львівській області з 40 тижня 2025 року по 20-й тиждень 2026 року (з 29 вересня 2025 до 17 травня 2026 року) на ГРВІ перехворіли 323 207 осіб (13,2 % від населення області), з них 151 269 (46,8 %) дітей.

Впродовж сезону епідемічна ситуація була стабільною і здебільшого відповідала фоновому рівню інтенсивності епідемічного процесу, не перевищуючи епідемічний поріг. Піки захворюваності реєструвалися на 51, 2 та 8 тижнях епідемічного сезону (рис. 1).

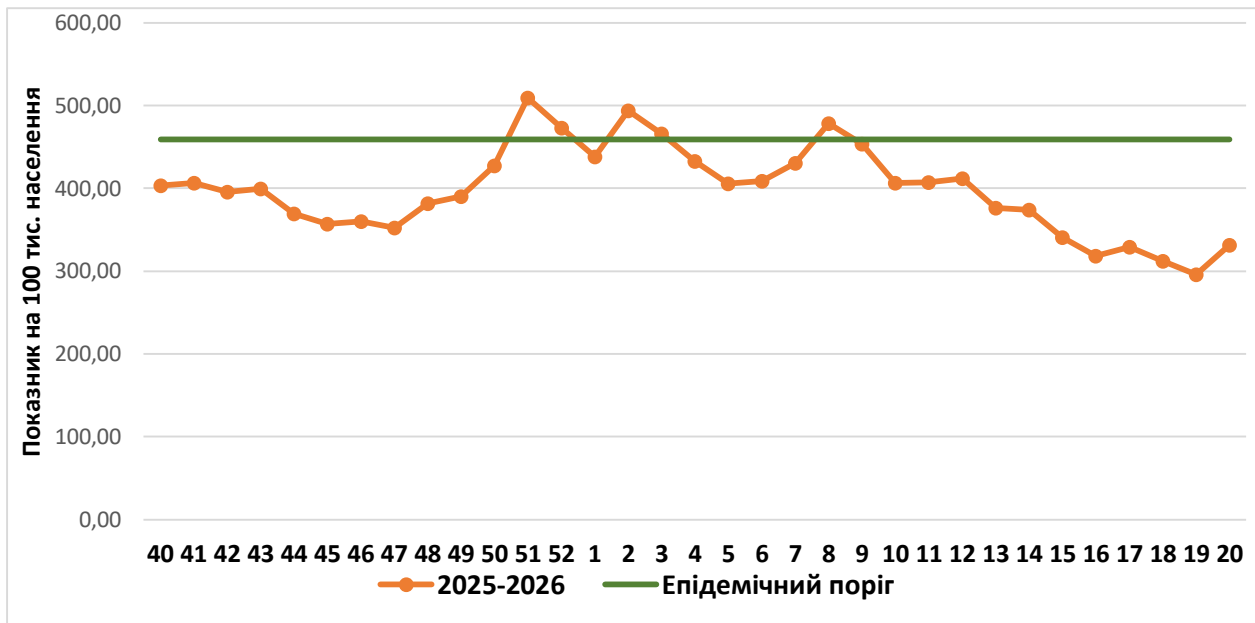


Рисунок 1. Рівень захворюваності на грип та ГРВІ впродовж епідемічного сезону 2025- 2026 років

В Україні також впроваджений епіднагляд за стічними водами. Визначено 63 точки відбору по 2-3 у 22-х областях України Враховано епідеміологічну доцільність та інфраструктурні можливості. Проводився відбір двічі на тиждень (понеділок, четвер), в той самий часовий проміжок. У Львівській області відбір здійснюється у містах Шептицький, Дрогобич та Львів. Впродовж епідсезону проведено 344 дослідження 140 позитивних проб на SARS-CoV-2 – 40,7% та 20 позитивних проб на грип А/В – 5,8%. Динаміка виявлених результатів дослідження стічних вод вказує на випередження на 2 тижні концентрації у стічних водах до епідемічного підйому захворюваності серед людей.

Найвищі рівні захворюваності на грип та ГРВІ реєструвалися у Шептицькому та Львівському районах (рис. 2).

В сукупній захворюваності на грип та ГРВІ питома вага дітей становила 46,8 %, дорослих – 53,2 %. Найбільша частка хворих відмічалась у вікових групах 30-64 роки (30,6 %) та 5-14 років (24,0 %) (рис. 3).

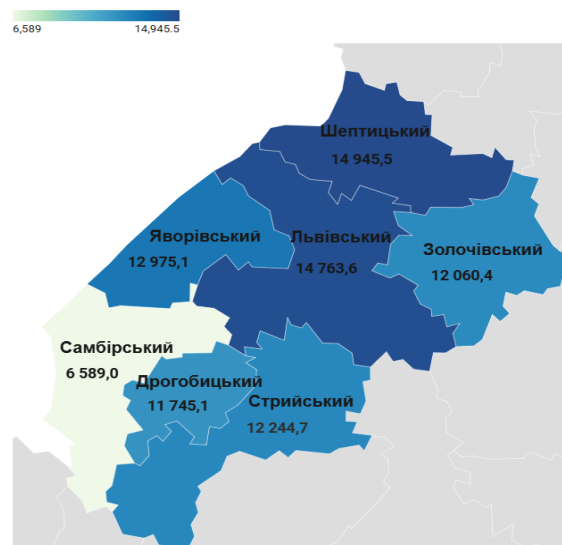


Рисунок 2. Територіальний розподіл захворюваності на грип та ГРВІ, включно з COVID-19, у Львівській області за епідемічний сезон 2025-2026

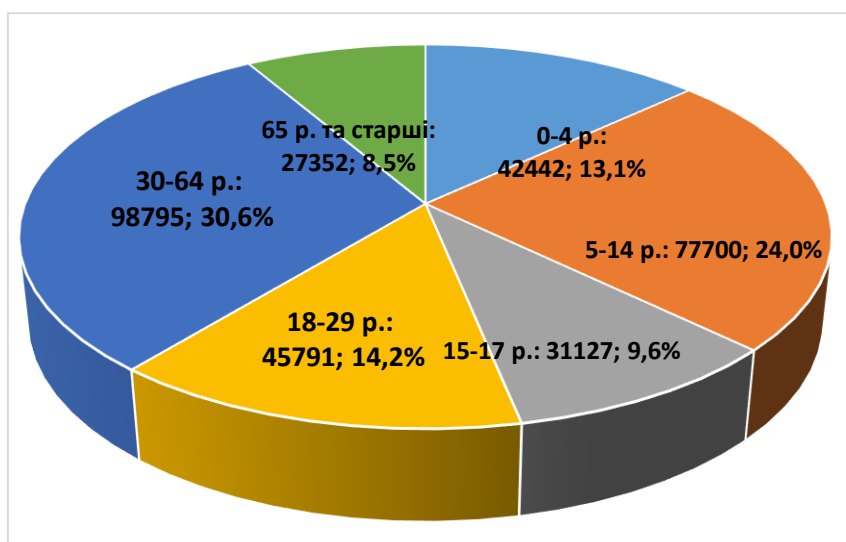


Рисунок 3. Віковий розподіл захворюваності на грип та ГРВІ, включно з COVID-19, у Львівській області за епідемічний сезон 2025-2026

Впродовж епідемічного сезону 2025-2026 років серед загальної кількості пацієнтів із ГРВІ за результатами тестування встановлено 1 208 випадків захворювання на COVID-19. У структурі грипу та ГРВІ питома вага захворюваності на COVID-19 становила 0,4%. Хворіло здебільшого доросле населення – 89,2 % від усіх захворілих.

За звітний період на стаціонарному лікуванні з приводу грипу та ГРВІ перебувало 5 235 пацієнтів, з них 2 402 дітей (45,9 %).

Серед усіх осіб, що перебували на стаціонарному лікуванні з приводу грипу та ГРВІ частка пацієнтів із COVID-19 становила 5,1%. (табл.1).

Таблиця 1

Результати секвенування зразків носоглоткових змивів

№ з/п	Лаб. № «ЦГЗ МОЗ України»	Лаб. № ЦКПХ*	Дата відбору	Результат ДУ «ЦКПХ МОЗ України»	Результат ДУ «ЦГЗ МОЗ України»	Генетична лінія
1.	92340	10565/27448	05.11.205	Позитивний	Позитивний	XFG.3.4.1
2.	92342	10679/27498	07.11.2025	Позитивний	Позитивний	XFG.30
3.	92343	10677/27496	07.11.2025	Позитивний	Позитивний	RN.2
4.	92347	11378/27840	02.12.2025	Позитивний	Позитивний	XFG.30
5.	92348	11420/27855	03.12.2025	Позитивний	Позитивний	XFG.30

* ДУ «Львівський обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України»

Також проводилось секвенування на грип зразків носоглоткових змивів. Результати представлені в табл.2.

Таблиця 2

Результати секвенування вірусів грипу та ГРВІ

№ з/п	Лаб. № «ЦГЗ МОЗ України»	Лаб. № ЦКПХ*	Дата відбору	Результат ПЛР	Генетична лінія
1.	5126	00378/222	14.01.2026	H3N2	A/Singapore/GP20238/2024(H3N2)
2.	5131	00439/281	19.01.2026	H1N1	A/Missouri/11_cell/2025(H1N1)
3.	5138	00559/310	21.01.2026	H3N2	A/Croatia/10136RV/2023(H3N2)
4.	5145	00753/428	27.01.2026	H1N1	A/Missouri/11_cell/2025(H1N1)
5.	5148	00866/476	29.01.2026	H3N2	A/Singapore/GP20238/2024(H3N2)
6.	5149	00936/512	02.02.2026	H1N1	A/Missouri/11_cell/2025(H1N1)
7.	5154	01171/621	09.02.2026	H3N2	A/Singapore/GP20238/2024(H3N2)
8.	5155	01175/624	09.02.2026	RSV B	RSVB/England198/2012

* ДУ «Львівський обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України»

Щотижнево оцінюється наявність вірусів у стічних водах. Вірус грипу був виявлений на 52 тижні 2025 року і виявлявся до 3-го тижня 2026 року (рис.4). В той же час вірус SARS-CoV-2 виявлявся впродовж всього епідсезону окрім 7 тижня 2026 року (рис.5).

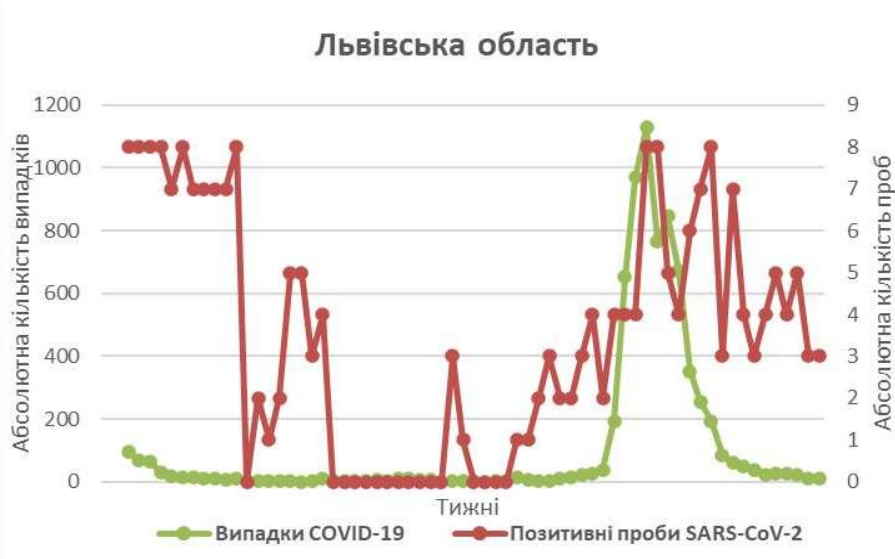


Рисунок 4. Динаміка виявлення позитивних зразків в стічних водах в епідсезоні



Рисунок 5. Динаміка наявності вірусів грипу та коронавірусу впродовж епідсезону 2025 - 2026 рр.

З початку поточного епідемічного сезону зареєстровано 21 летальний випадок від грипу типу А, 2 летальних випадки серед пацієнтів із позитивним результатом тесту на COVID-19, 1 летальний випадок від аденовірусу, 1 від РС-вірусу та 1 від метапневмовірусу.

З початку епідемічного сезону проти грипу вакциновано 11 030 осіб, з них 4 205 (38,1%) – з груп медичного та епідемічного ризику. Згідно з Наказом МОЗ від 14.11.25. №1722 «Про затвердження змін до Календаря профілактичних щеплень» вакцинація проти грипу належить до числа рекомендованих. Щеплення проводиться після досягнення віку 6 місяців. Щороку напередодні (оптимально) / впродовж епідемічного сезону грипу. Для дітей віком до 9 років, якщо дитина вакцинується вперше в житті, необхідно ввести 2 дози вакцини з мінімальним інтервалом 4 тижні. Надалі вакцинація проводиться щороку 1. Щеплення проти грипу також проводяться вагітним жінкам в будь-який строк вагітності згідно з інструкцією до медичного застосування вакцини².

ВИСНОВКИ

Впродовж сезону епідемічна ситуація була стабільною і здебільшого відповідала фоновому рівню інтенсивності епідемічного процесу, не перевищуючи епідемічний поріг. Піки захворюваності реєструвалися на 51, 2 та 8 тижнях епідемічного сезону. Зважаючи на підсумки епідемічного сезону 2025-2026 років та ймовірність зростання захворюваності на грип та ГРВІ у міжепідемічний період закладам охорони здоров'я необхідно::

- дотримуватись заходів з профілактики інфекцій та інфекційного контролю під час надання медичної допомоги пацієнтам відповідно до вимог наказу МОЗ України від 03.08.2020 №1777 «Про затвердження Заходів та Засобів щодо попередження інфікування при проведенні догляду за пацієнтами»³;

- забезпечити лікування пацієнтів з діагнозами «Грип» та «ГРВІ» відповідно до Уніфікованого клінічного протоколу первинної, вторинної (спеціалізованої) медичної допомоги дорослим та дітям "Грип" та Уніфікованого клінічного протоколу первинної медичної допомоги дорослим та дітям "Гострі респіраторні інфекції", затверджених Наказом МОЗ України від 16.07.2014 №499 «Про затвердження та впровадження медико-технологічних документів зі стандартизації медичної допомоги при грипі та гострих респіраторних інфекціях»⁴;

- проводити активне спостереження та амбулаторне лікування хворих на грип та ГРВІ із застосуванням препаратів для противірусної терапії, відповідно до лікувальних протоколів та настанов. Обґрунтовано підходити до антибіотикотерапії у пацієнтів з грипом та ГРВІ, заборонити використання антибіотиків з групи В та С на амбулаторному етапі лікування;

- організовувати обстеження осіб з ознаками грипу та ГРВІ з використанням швидких тестів;
- забезпечити місця для утилізації медичних масок;
- забезпечити режим провітрювання, бактерицидне опромінення кабінетів лікарського прийому, маніпуляційних, а також місць загального користування (хол, коридори, рекреаційні зони, чекальні, реєстратура, тощо);

- не допускати до роботи працівників з ознаками грипу та ГРВІ.

Виявлення в стічних водах РНК вірусу грипу та COVID-19 випереджує на 2 тижні епідемічний підйом захворюваності серед людей.

² Наказ МОЗ від 14.11.25. №1722 «Про затвердження змін до Календаря профілактичних щеплень».

³ Наказ МОЗ України від 03.08.2020 №1777 «Про затвердження Заходів та Засобів щодо попередження інфікування при проведенні догляду за пацієнтами».

⁴ Наказ МОЗ України від 16.07.2014 №499 «Про затвердження та впровадження медико-технологічних документів зі стандартизації медичної допомоги при грипі та гострих респіраторних інфекціях».

ВИКЛИКИ СЬОГОДЕННЯ ТА СУЧАСНІ РІЗНОВИДИ АДИКТИВНОЇ ПОВЕДІНКИ У ПІДЛІТКІВ ТА МОЛОДІ

CURRENT CHALLENGES AND MODERN FORMS OF ADDICTIVE BEHAVIOR AMONG ADOLESCENTS AND YOUNG ADULTS

Кігічак-Борщевська Анжела Вікторівна, кандидат медичних наук, доцент, доцент кафедри психіатрії та дитячої психіатрії, психотерапії та клінічної психології факультету післядипломної освіти, ДНТ "Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького", angela_kb@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9353-4682>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.14>

Анотація. В роботі досліджено структуру викликів сучасності та чинників, які призводять до трансформації звичних патернів підліткової поведінки в адиктивну поведінку, з урахуванням українського військового сьогодення. Представлено особливості соціального середовища розвитку теперішнього покоління підлітків, структуру психологічної готовності підлітків та молоді до адиктивної поведінки та подвійну взаємодію тривожних розладів і зловживання канабісом. Описано контексти сучасного віртуального середовища, які сприяють цифровому стресу та створюють умови до хімічних та поведінкових uzalezhenn'ya, з врахуванням континууму здорового і нездорового використання електронних медіа. Висвітлено нові тенденції щодо фізичної активності та спорту як можливих ресурсів здоров'я та превенції зловживань та одночасних потенційних чинників ризику з їхньою багатовимірністю впливу (надмірні вимоги та очікування, що перевищують фізичну та/або емоційну зрілість, негативна участь дорослих, ризик травмування, використання препаратів з адиктивним потенціалом, uzalezhenn'ya від вправ, поєднання з розладами харчової поведінки та іншими психічними дефіцитами. Окреслено системні стратегії та екологічні системи, що можуть сприяти превенції хімічних та поведінкових uzalezhenn'ya та покращувати довгострокові траєкторії психічного здоров'я підлітків та молоді.

Ключові слова: виклики сьогодення та адиктивна поведінка підлітків, цифровий стрес, континуум здорового-нездорового використання електронних медіа, зловживання ПАР підлітками, подвійний потенціал спорту в контексті здоров'я та зловживання.

Abstract. This study examines the nature of contemporary challenges and the factors that lead to the transformation of typical adolescent behavior patterns into addictive behavior, taking into account the current military situation in Ukraine. It presents the characteristics of the social environment in which the current generation of adolescents is developing, the structure of adolescents' and young adults' psychological readiness for addictive behavior, and the dual interaction between anxiety disorders and cannabis abuse. The contexts of the modern virtual environment that contribute to digital stress and create conditions for chemical and behavioral addictions are described, taking into account the continuum of healthy and unhealthy use of electronic media. New trends regarding physical activity and sports are highlighted as potential resources for health and the prevention of digital addiction and substance abuse, as well as simultaneous potential risk factors with their multidimensional impact (excessive demands and expectations that exceed physical and/or emotional maturity, negative adult involvement, risk of injury, use of substances with addictive potential, exercise addiction, and co-occurrence with eating disorders and other

mental health conditions. Systemic strategies and environmental systems that can contribute to the prevention of chemical and behavioral addictions and improve long-term mental health trajectories among adolescents and young adults are outlined.

Keywords: contemporary challenges and addictive behavior among adolescents, digital stress, the continuum of healthy versus unhealthy use of electronic media, substance abuse among adolescents, the dual potential of sports in the context of health and abus

У кожного періоду життя є своє завдання, з
яким необхідно зіткнутися віч-на-віч, щоб знайти
власні
Кевін Кун, книга «Хікікоморі»

ВСТУП

Соціальне значення здоров'я підлітків та молоді зумовлене тим, що вони становлять найближчий репродуктивний, інтелектуальний, економічний, соціальний, політичний та культурний потенціал суспільства. Разом з тим, юні є чутливою частиною суспільства, яка першою резонує на всі виклики сучасності.

Сьогодні ми стикаємося з украй динамічним, нелінійним соціумом, описаним у категоріях «плинної сучасності» (Zygmunt Bauman), «кінця сталості» (Alvin Toffler) або «світу, який вислизає» (Baron Anthony Giddens). Виникає ситуація втрати рівноваги між швидкістю соціальних трансформацій і швидкістю людської реакції і це набуває характеру соціального стресу. Деякі риси сучасності – це відсутність стабільності, надлишок інформації (щоденний інформаційний душ) та засилля цифрового контенту, слабкі зв'язки, часті економічні та політичні кризи, пріоритет споживання, розмиті орієнтири, девальвація досвіду старшого покоління. До недавніх світових викликів пандемії додалися над випробування щодо війни в Україні.

У перехресному дослідженні, яке охопило 8096 українських підлітків, що проживають в Україні та за кордоном, підлітки, які зазнали впливу війни, мали більшу ймовірність отримати позитивний результат скринінгу на психічні розлади. Згідно з оцінками на національному рівні, 32,0% з 8096 підлітків в Україні мали позитивний результат скринінгу на помірну або тяжку депресію, 17,9% на помірну або тяжку тривожність, 35,0% на клінічно значущу психологічну травму, 29,5% на розлади харчової поведінки та 20,5% на середній або вищий ризик вживання психоактивних речовин (ПАР).¹

Європейський проєкт опитування учнів щодо вживання алкоголю та інших наркотичних речовин (ESPAD) у 2024 році відзначає 30-річчя моніторингу ризикованої поведінки підлітків у Європі, у якому беруть участь 37 країн-учасниць. Хоча в центрі уваги залишається поведінка та тенденції вживання ПАР, у цьому виданні увага акцентується на психічному добробуті та профілактичних заходах, визнаючи дедалі більшу важливість цих аспектів у формуванні здоров'я підлітків. Оскільки поведінка підлітків змінюється, довгостроковий моніторинг ESPAD продовжує надавати важливу інформацію, яка допомагає спрямовувати профілактичні та політичні зусилля, гарантуючи, що заходи реагування залишатимуться ефективними й актуальними.

Попри тривале зниження рівня вживання ПАР, нові тенденції викликають занепокоєння. Так, серед підлітків різко зросло споживання електронних сигарет, при цьому зростають показники

¹ Goto R, Pinchuk I, Kolodezhny O, Pimenova N, Kano Y, Skokauskas N. Mental Health of Adolescents Exposed to the War in Ukraine. *JAMA Pediatr.* 2024;178(5):480–488. doi:10.1001/jamapediatrics.2024.0295

раннього початку та щоденного споживання, що посилює занепокоєння щодо подвійного використання традиційних та електронних сигарет і відображає ширший зсув до альтернативних нікотинових продуктів.

Споживання алкоголю також зменшилося з часом, причому зокрема, загальне та надмірне вживання. Однак це зменшення є більш вираженим серед хлопців, тоді як дівчата демонструють стабільнішу тенденцію. Попри цей прогрес, алкоголь залишається широко доступним, а ранній початок вживання та епізодичне вживання алкоголю в деяких регіонах залишаються серйозною проблемою.

Якщо розглядати окремі речовини, то найпоширенішим наркотиком є канабіс (12% вживання протягом життя), за ним йдуть кокаїн (2,3%), екстазі/МДМА (2,1%), ЛСД або інші галюциногени (1,8%) та амфетамін (1,8%). У середньому для кожної речовини серед хлопців показники поширеності протягом життя є вищими, ніж серед дівчат.

Крім речовин змінюються поведінкові ризики. Серед учнів ESPAD різко зросла популярність ігор, особливо серед дівчат, і вони перестали бути переважно чоловічим заняттям, що відображає ширші зміни в цифровій поведінці. Попри зростання участі, сприйняття проблемних ігор залишається стабільним. З іншого боку, занепокоєння щодо проблемного використання соціальних мереж зросло, особливо серед хлопців, тоді як серед дівчат цей показник залишається високим.

Передбачуване проблемне використання соціальних медіа зросло з 38% у 2015 році до 47% у 2024 році. Зростання було більш вираженим серед хлопців, збільшившись із 30% до 41%, у той час як серед дівчат цей показник залишався стабільно високим, коливаючись приблизно на рівні 53–54%.²

Метою є дослідження структури викликів сучасності та чинників, які призводять до трансформації звичних патернів підліткової поведінки в адиктивну поведінку.

МЕТОДОЛОГІЯ

Методи аналізу і синтезу (при аналізі наявних статистичних та емпіричних даних); монографічних узагальнень і структурного аналізу (при опрацюванні доступних ресурсів щодо тематики); наукової абстракції та функціонального аналізу (для узагальнення матеріалу); графічної візуалізації та відкритих обговорень (під час представлення досліджень на конференціях).

РЕЗУЛЬТАТИ

Підлітковий вік та раннє доросле життя є критичним періодом нейропсихологічного розвитку. Завдяки пластичності мозку, що розвивається, молодь особливо вразлива до екологічних, соціальних та фізіологічних чинників, які можуть сприяти виникненню та прогресуванню психічних та поведінкових дефіцитів. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ, 2022) визначає підлітковий вік як період, що характеризується можливостями для розвитку та набуття навичок, пов'язаних із навчанням протягом усього життя та здоров'ям. Саме ранній підлітковий вік (від 10 до 13 років) характеризується початком емоційних, когнітивних та соціальних змін, що можуть впливати на формування психічних дефіцитів у майбутньому. Середній етап підліткового віку (від 14 до 17 років) відповідає тривалому фізичному та соціально-когнітивному періоду розвитку, що поєднується з великою кількістю викликів. Перехід між цими етапами супроводжується зростанням особистої автономії та участю в різних видах діяльності поза межами формального освітнього середовища або батьківського нагляду, що пов'язано, зокрема, з початком вживання ПАР. Мозок підлітка – це динамічний і мінливий орган, що поступається лише мозку дитини з точки зору синаптогенезу. Завдяки своїм рисам пошуку відчуттів і ризику, він

² Основні висновки Європейського проєкту опитування учнів щодо вживання алкоголю та інших наркотичних речовин у 2024 році (ESPAD). Взято з https://www.euda.europa.eu/publications/data-factsheets/espad-2024-key-findings_uk.

оптимізований для виживання в природному середовищі, але погано підготовлений до сучасного світу, в якому речовини, що викликають uzалежнення, широко доступні.

Вживання ПАР є, на жаль, поширеним та ендемічним серед підлітків. Підлітки зазвичай наражаються на різні ризики у своєму повсякденному житті, і зловживання ПАР не є винятком. Однак вживання ПАР у юному віці не є синонімом узалежнення, а може також бути нормативною, розвиваючою поведінкою, яка сприяє інтеграції з однолітками та збагаченню соціального й індивідуального досвіду.

Фактори, що впливають на розвиток адиктивної поведінки начебто відомі, проте жоден з них не є вирішальним, а ієрархія їх не визначена. Навіть якщо на підлітка впливає сукупність цих факторів, це ще не означає, що зловживання ПАР розвинеться в узалежнення.

Підлітковий мозок схильний до вживання ПАР. Він також особливо вразливий до негативних наслідків їх вживання. Ці подвійні вразливості є причинами того, що підлітки повинні бути основними цілями для запобігання вживанню ПАР.

Широкий спектр індивідуальних факторів ставить деяких підлітків у більший ризик вживання ПАР, а саме: генетика та навколишнє середовище, девіантна поведінка, вплив однолітків, темпераментні характеристики та стан ментального здоров'я. Численні дослідження показали, що підлітки особливо сприйнятливі до вживання наркотиків порівняно з дорослими через нейроанатомічні зміни, включаючи ті, що відбуваються в префронтальній корі (ПФК), стріатарній корі та лімбічній системі. ПФК, яка є частиною мозку для міркування та прийняття рішень, росте в дитинстві, але піддається прунінгу в підлітковому віці. У той же час, підліткова стріарна кора стає більш чутливою до негайних нагород, таких, наприклад, як цукор, гроші, ПАР, у порівнянні з дитиною або дорослим. Крім того, лімбічна область, яка опрацьовує емоції та пам'ять, дозріває раніше в підлітковому віці, тоді як ПФК відстає і продовжує розвиватися до 25 років. З цих причин підлітки, як правило, приймають рішення, засновані на емоціях та негайних винагородах замість довгострокових наслідків, що робить їх більш схильними до експериментів з ПАР³.

Психологічна готовність до адиктивної поведінки – це особистісне новоутворення, що детермінує готовність до уживання ПАР і складається з таких компонентів: відсутність мотивації досягнення (перевага натомість унікаючої мотивації), аж до відмови вважати себе суб'єктом діяльності; несформованість функції прогнозу поведінки; низький рівень розвитку самоусвідомлення, відсутність навичок рефлексії; екстернальний локус контролю; низький рівень самоповаги, аж до неприйняття образу «Я», який, однак, може маскуватися захисною поведінкою, що демонструє завищену самооцінку; самозахисний тип реакції на фрустрацію, що виявляється у відмові від діяльності при зіткненні з найменшими труднощами; суперечність самооцінки та рівня домагань, що виявляється в алогічності та непослідовності діяльності, яка пов'язана з подоланням перешкод; тенденція до втечі від реальності в ситуації фрустрації.⁴

Тривожні розлади (наприклад, генералізований тривожний розлад, соціальний тривожний розлад) є дуже поширеними серед підлітків та молоді і пов'язані з несприятливими наслідками в подальшому житті. За оцінками, поширеність тривожних розладів у США становить 31,9% серед підлітків (віком 13–18 років) та 14,7% серед молодих дорослих (віком 18–25 років). Середній вік початку будь-якого тривожного розладу у світі становить 17 років, що робить раннє виявлення та профілактику надзвичайно важливими. Деякі тривожні розлади починаються навіть у більш ранньому

³ Hsiung H, Patel K, Hundal H, et al. (July 27, 2022) Preventing Substance Abuse in Adolescents: A Review of High-Impact Strategies. *Cureus* 14(7): e27361. doi:10.7759/cureus.27361

⁴ Максимова Н.Ю. Перша Всеукраїнська науково-практична конференція з адиктології 16-17.09. 2023р.: 36. Матеріалів. С. 84-92

віці через зміни в соціальних відносинах у дитинстві та підлітковому віці; середній вік початку розладів, пов'язаних із розлукою та соціальною тривожністю, становить відповідно 8 та 13 років. У дослідженні було проаналізовано сучасну літературу щодо двох найпоширеніших психічних та поведінкових проблем серед підлітків та молодих дорослих: тривоги та вживання канабісу⁵.

Зокрема, серед тривожних розладів соціальна тривожність може бути позитивно пов'язана з проблемами, пов'язаними з канабісом. Канабіс посідає друге місце серед найчастіше вживаних речовин після алкоголю (ООН, 2024). За даними Всесвітньої доповіді про наркотики за 2024 рік, 14,3 мільйона (5,5%) 15-16-річних підлітків у всьому світі вживали канабіс протягом минулого року. Європейський шкільний проект щодо алкоголю та інших наркотиків (ESPAD) виявив зростання вживання нелегальних наркотиків, особливо канабісу, за останні 9 років⁶.

Канабіс – є одним із найпоширеніших наркотиків серед 15-16-річних школярів, з середнім показником попереднього вживання впродовж життя на рівні 30% в Європі (EMCDDA, 2012) та 35% у Сполучених Штатах (NIDA, 2014). Завдяки тому, що більшість підлітків, які вживають канабіс у шкільні роки, не кидають навчання, ця специфічна група населення є корисною у спробі зрозуміти предиктори подальшого шляху споживання.

Чотири компоненти соціальної тривожності (тривожність у ситуаціях соціальної взаємодії, тривожність у ситуаціях виконання, уникнення в ситуаціях соціальної взаємодії, та уникнення в ситуаціях виконання) мали значущий негативний вплив на вживання канабісу впродовж життя. Оскільки вживання канабісу – це груповий процес, уникнення ситуацій, в яких підлітки можуть вступати в контакт з наркозалежними, може бути превентивною стратегією.

Таким чином, якщо підлітки відносно сильно страждають від симптомів соціальної тривоги («відносно» через їхню заангажованість у добре відрегульовану шкільну кар'єру), то вони або уникають соціальних ситуацій, а отже, зменшують свій ризик вживання канабісу. Або, якщо вони цього не роблять, їхні емоції змушують їх боятися негативного впливу вживання на їхню поведінку, і тому вони не ризикують наражати себе на негативний осуд з боку оточуючих.

В майбутньому, деякі дослідження можуть бути проведені щодо захисного ефекту певних психопатологічних симптомів, що нагадують нам про залучення двох основних процесів у підлітковому віці : тривоги, яка, незважаючи на свої негативні конотації, є важливим почуття, яке може завадити тривожним людям йти на ризик; та соціалізації, яка, незважаючи на свою нормативну цінність, є фактором ризику вживання ПАР.⁷

Нині розповім про тіла, перетворені на форми нові...

Давньоримський поет Овідій, «Метаморфози».

Цифрові технології експлуатують ті самі системи
винагороди мозку, що й наркотики

Анна Lembke, психіатр-адиктолог, Стенфорд

Високий рівень проникнення цифрових технологій веде до того, що переважна більшість людей є їх активними користувачами і представляють новий антропологічний тип – людину

⁵ Colleen Stiles-Shields, Joseph Archer, Jim Zhang A Scoping Review of Associations Between Cannabis Use and Anxiety in Adolescents and Young Adults. Child Psychiatry Hum Dev . 2021 Nov 1;54(3):639–658. doi: 10.1007/s10578-021-01280-w.

⁶ Розлад вживання психоактивних речовин у підлітків: епідеміологія, клінічні ознаки, оцінка та діагностика. 01.2024. <https://www.uptodate.com>.

⁷ Schmits E, Mathys C, Quertemont E. A longitudinal study of cannabis use initiation among high school students: Effects of social anxiety, expectancies, peers and alcohol. J Adolesc. 2015 Jun;41:43-52. doi: 10.1016/j.adolescence.2015.02.009. Epub 2015 Mar 23. PMID: 25800726.

підключену і технологічно добудовувану. Віртуальний світ, як будь-яке відображення, є «перетвореною формою» соціальної реальності, яка її не тільки відображає, а й спотворює, а також функціонує часто за своїми власними, «перетвореними» законами. Регулярне перемикавання між двома світами, реальним та цифровим, їх поєднання створюють переживання змішаної реальності, як складної кіберфізичної системи (рис. 1).

Цілісне сприйняття цієї системи в єдиному часово-просторовому континуумі, в свою чергу, сприяє розвитку нової гібридної ідентичності. Конструювання цієї ідентичності через віртуальну самопрезентацію призводить до «множення» кількості самокатегоризацій та соціальних ролей, а також вимагає регулярної адаптації в умовах постійних трансформацій. Все вказане призводить до нових викликів щодо ментального здоров'я та потреб нового переосмислення його меж.

Оскільки дорослішання сучасних підлітків проходить у нових соціальних умовах, склалася особлива ситуація розвитку. По-перше, процеси соціалізації відбуваються в новому, поєднаному з реальним життям цифровому і віртуальному середовищі. Це не просто існуючі паралельно реальний і віртуальний життєві простори, це нове середовище проживання, реальне за своїми відчуттями і переживаннями для підлітка, і віртуальне за способом опосередкування взаємодії. По-друге, в зв'язку з радикальними трансформаціями суспільного життя, школа і сім'я втрачають статус соціальних інститутів, що визначають напрям, зміст і результати соціалізації дітей. Соціалізація сучасних підлітків відбувається під впливом інших соціалізаційних агентів із новими формами, умовами та механізмами впливів. Зокрема, новими агентами соціалізації сучасних дітей, підлітків і молоді багато дослідників називають інтернет та соціальні медіа.

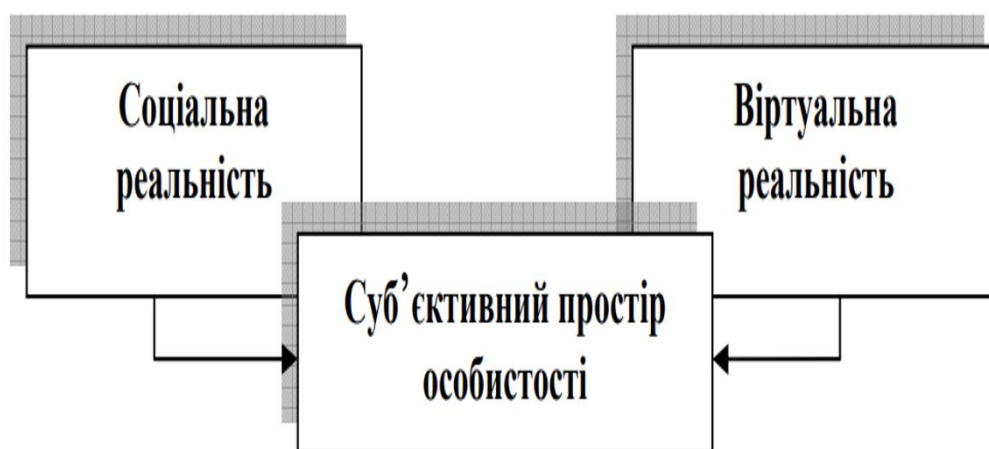


Рисунок 1. Схема інформаційно-комунікативних потоків у сучасному світі⁸

Соціалізація в нових умовах вирізняється низкою особливостей. Крім феномена розмивання кордонів між онлайн і офлайн реальностями, дослідники відзначають нові явища: формування цифрової особистості або кількох віртуальних особистостей, зрощення людини з гаджетами та цифровими пристроями, зміну меж традиційної сімейної системи завдяки цифровим комунікаціям, розширення часу впливу освітніх інститутів на життя підлітків і молоді за межами освітніх установ. Якщо дорослі мають досвід успішного функціонування в реальному житті та не завжди успішні й

⁸ Немеш О.М. Віртуальна діяльність особистості: структура та динаміка психологічного змісту: монографія. Київ: Слово, 2017. 391 с.

ефективні у віртуальному середовищі, у взаємодії з цифровими технологіями, то молоде покоління, компетентніше в цифровому середовищі, але недосвідчене в реальному житті.

Якісна своєрідність підліткового віку пов'язана з початком включення в доросле життя з освоєнням відповідних цьому життю норм і правил. Оскільки жодного місця, окрім дитячого, у системі стосунків з дорослими (з батьками, педагогами) підліток зайняти не може, він шукає нові форми самовизначення в тих спільнотах, де його рольова визначеність і статус ще не встановлені. Цифрове середовище являє собою широке поле можливостей такого роду. Для сучасних підлітків характерний пріоритет соціалізації саме в цифровому середовищі, насамперед через рольову і статусну невизначеність цього середовища. Тут і складається нова соціальна ситуація розвитку, тут освоюється нова сукупність норм, на основі яких будуються соціальні взаємини. Соціалізація в цифровому середовищі для підлітка – це соціалізація, заснована на незалежності та самовираженні⁹.

Соціальні мережі стали центральною частиною життя підлітків, які часто використовують соціальні медіа-платформи. Соціальні ЗМІ використовуються для підтримки контакту з друзями та сім'єю, обміну та коментування публікацій, тоді як деякі підлітки є більш пасивними користувачами соціальних медіа. Багато тінейджерів проводять чимало часу перед екраном; згідно з норвезьким опитуванням, 74% проводять більше 3 годин свого дозвілля перед екраном щодня. Цей майже постійний цифровий зв'язок з однолітками докорінно змінив те, як підлітки взаємодіють і підтримують стосунки, потенційно посилюючи або змінюючи соціальні вимоги, невизначеність та очікування.

Дослідження цифрового стресу – це сфера, спрямована на виявлення та опис аспектів використання цифрових пристроїв, які викликають стрес, а також факторів, пов'язаних з таким стресом. Цифровий стрес – це термін, який описує суб'єктивну стресову реакцію на використання цифрових ресурсів, таких як соціальні мережі. Соціальні медіа можуть різними способами призводити до стресу, тиску та очікувань серед підлітків, що, в свою чергу, може вплинути на їхнє психічне здоров'я.

Стрес від соціальних мереж може відрізнятися від інших форм стресу через постійну доступність та посилення соціальних порівнянь, норм однолітків, та інших аспектів соціальної взаємодії¹⁰.

На відміну від традиційних стресорів, стрес у соціальних мережах часто пов'язаний з віртуальною презентацією себе, миттєвим і прямим зворотним зв'язком, а також тиском на підтримку онлайн-взаємодії, що може посилити почуття неадекватності та страх ізоляції. Що стосується психічного благополуччя, було визначено кілька компонентів цифрового стресу, які потенційно можуть мати відношення до нього, зокрема, занепокоєння/стрес щодо доступності, тривога щодо схвалення, страх втрачених можливостей (FOMO, «Fear of missing out»), комунікативне перевантаження та онлайн-пильність. Підлітки, зокрема, прагнуть бути привабливими та популярними серед однолітків, тиск і пов'язані з цим переживання є факторами, які можуть призвести до дистресу¹¹.

Вживання наркотиків серед підлітків може бути пов'язане з перебуванням у групах однолітків, а також з наступними факторами ризику. Підлітки, які вважають, що їхні друзі схвалюють вживання

⁹ Soldatova G.U., Chigarkova S.V., Ilyukhina S.N. Metamorphosis of the Identity of the Human Completed: from Digital Donor to Digital Centaur. *Social Psychology and Society*, 2021. Vol. 12, no. 1, p. 40–57.

¹⁰ Brobakke, S. K., Drageset, J., Andersen, A. I. O., & Skogen, J. C. (2025). Association Between Social Media as a Stressor and Illegal Drug Use Among Adolescents in Norway: Findings from the “LifeOnSoMe”-Study. *Journal of Child & Adolescent Substance Use*, 30(3), 103–118. DOI: 10.1080/29973368.2025.2485031.

¹¹ Andersen, A. I. O., Finserås, T. R., Hjetland, G. J., Sivertsen, B., & Skogen, J. C. (2023). Behind the screens: What underlies the experience of social media as a stressor among adolescents. *The European Journal of Public Health*, 33(Suppl 2), ckad160–865. doi: 10.1093/eurpub/ckad160.865. PMID: 10595748.

наркотиків, більш схильні експериментувати з наркотиками або вживати їх самі. Соціальні медіа можуть посилювати таке сприйняття, збільшуючи експозицію норм і поведінки однолітків, що може посилювати як цифрові стресори так і тиск, щоб отримати соціальне схвалення.

Дослідження також вказують на те, що підлітки піддаються впливу маркетингу алкоголю, тютюну, та незаконних наркотиків через соціальні медіа. Нелегальні наркотики, згадані в соціальних мережах, також є речовинами, які часто вживаються серед підлітків. На жаль, контент про нелегальні ПАР в соціальних мережах має позитивну тональність, а про негативні наслідки та проблеми зі здоров'ям, які можуть виникнути внаслідок вживання цих речовин, повідомляється менше.

Дослідження показали позитивний зв'язок між використанням соціальних медіа та стресом серед підлітків. Рушійними факторами сприйняття стресу можуть бути невпевненість у власному іміджі, відчуття низької популярності, страх втрачених можливостей (FOMO) та дезінформація¹².

Здорове користування означає використання Інтернету з певною метою та протягом розумного часу, без когнітивного чи поведінкового дискомфорту.

Здорові користувачі Інтернету вміють відокремлювати інтернет-комунікацію від спілкування в повсякденному житті. Вони використовують Інтернет як корисний інструмент для досягнення цілей, а не як джерело ідентичності. Немає певного часового обмеження чи будь-якого орієнтира щодо поведінки¹³.

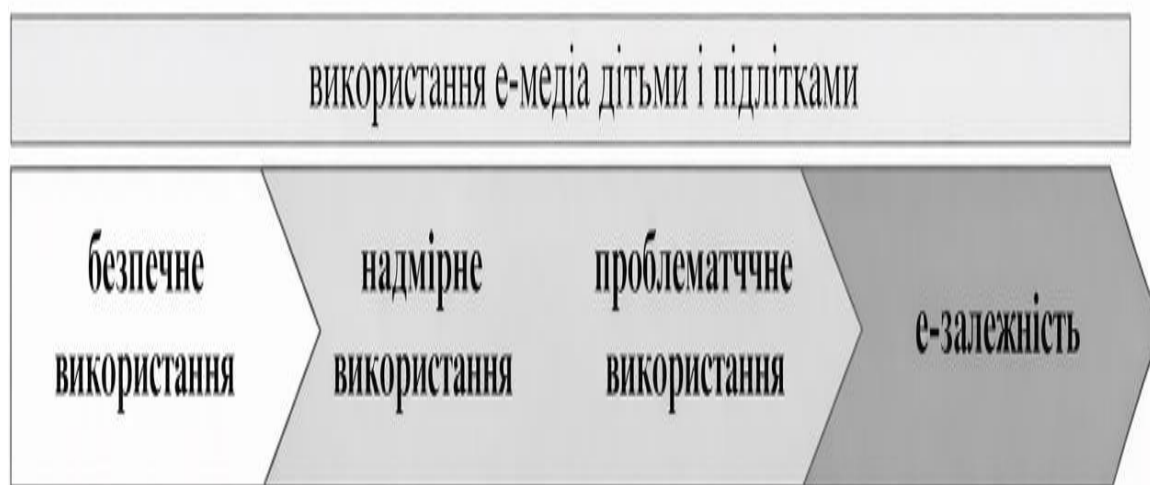


Рисунок 2. Операційна схема процесуального підходу до аналізу розвитку ризику електронної залежності¹⁴

Неможливо провести чітку межу між здоровим та патологічним використанням нових медіа, оскільки не існує універсального для всіх користувачів мережі порогу адаптивної чи дезадаптивної

¹² Arias López MDP, Ong BA, Borrat Frigola X, Fernández AL, Hicklent RS, Obeles AJT, Rocimo AM, Celi LA. Digital literacy as a new determinant of health: A scoping review. PLOS Digit Health. 2023 Oct 12;2(10):e0000279. doi: 10.1371/journal.pdig.0000279. PMID: 37824584; PMCID: PMC10569540.

¹³ Profilaktyka, diagnoza i terapia e-uzależnień wśród dzieci i młodzieży. Praktyczny podręcznik dla specjalistów pracy z dziećmi i ich rodzinami. Anna Wojtkowska, Agata Gąsiorowska (Fundacja Badań Społecznych, 2024). Warszawa: Wydawnictwo Liberi Libri, 2024. www.LiberiLibri.pl. ISBN: 978-83-63487-69-0.DOI: 10.47943/lib.9788363487690.

¹⁴ Profilaktyka, diagnoza i terapia e-uzależnień wśród dzieci i młodzieży. Praktyczny podręcznik dla specjalistów pracy z dziećmi i ich rodzinami. Anna Wojtkowska, Agata Gąsiorowska (Fundacja Badań Społecznych, 2024). Warszawa: Wydawnictwo Liberi Libri, 2024. www.LiberiLibri.pl. ISBN: 978-83-63487-69-0.DOI: 10.47943/lib.9788363487690.

поведінки та пізнавальної залученості. Натомість саме особа визначає ступінь, в якому вона використовує Інтернет адаптивно або неадаптивно. У зв'язку з цим дослідник пропонує континуум поведінки від здорового, безпечного та конструктивного використання Інтернету до максимально вираженої неадаптивної поведінки. Між ними існують різні ступені поведінки, які виходять за межі полюса здоров'я, але не мають повних ознак залежності. Проте така поведінка підвищує індивідуальний ризик виникнення проблем і, як наслідок, може призвести до втрати контролю та розвитку клінічної форми розладу психічного здоров'я¹⁵.

Аналіз змін у концепціях інтернет-залежності виявляє кілька основних тенденцій:

1. Перехід від вузького клінічного трактування проблеми в категоріях залежності до ширшого за змістом поняття «проблемне використання Інтернету», що охоплює також здорових людей.

2. Перехід від загального зловживання Інтернетом до зосередження на його різних аспектах, таких як ігри, соціальні мережі чи телефони, а також пошук спільних механізмів, що поєднують різні е-активності.

3. Перехід від зосередження на ознаках проблемної поведінки до розуміння функцій, які вона виконує у складному контексті життя особистості.

Нижче малюнками представлено певні моделі.



Рисунок 3. Схема розвитку проблемного використання Інтернету за Carplana (2010)¹⁶

¹⁵ Там само.

¹⁶ Profilaktyka, diagnoza i terapia e-uzależnień wśród dzieci i młodzieży. Praktyczny podręcznik dla specjalistów pracy z dziećmi i ich rodzinami. Anna Wojtkowska, Agata Gąsiorowska (Fundacja Badań Społecznych, 2024). Warszawa: Wydawnictwo Liberi Libri, 2024. www.LiberiLibri.pl. ISBN: 978-83-63487-69-0.DOI: 10.47943/lib.9788363487690

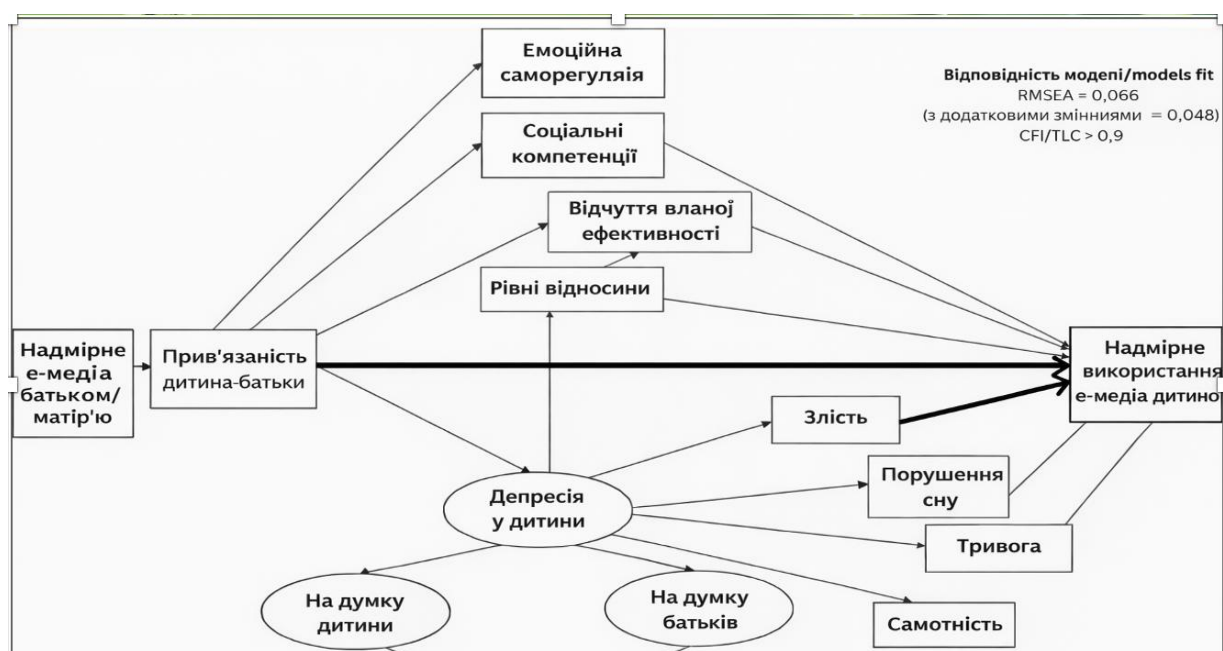


Рисунок 4. Модель структурних рівнянь (SEM), що пояснює загальну гостроту проблеми надмірного використання електронних засобів масової інформації за оцінкою учнів

Як вказують дослідники, найпотужнішими предикторами ризику інтернет-узалечнення у підлітків були рівень їхнього гніву та стиль прихильності до матерів. Якість цих стосунків безпосередньо пов'язана з емоційною саморегуляцією дітей, їхніми соціальними компетенціями та почуттям власної ефективності, які, у свою чергу, безпосередньо поєднані зі схильністю дітей до зловживання електронними медіа. Крім того, стиль прихильності дітей до матерів був предиктором інтенсивності проявів клінічної депресії у підлітків, що опосередковано корелювало з ризиком е-залежності: більша інтенсивність депресії була пов'язана з більшою злістю, страхом та проблемами зі сном, а це, у свою чергу, безпосередньо зумовлювало схильність підлітків до зловживання електронними медіа. Інтенсивність депресивного розладу також поєднувалась з гіршими стосунками з однолітками та нижчим почуттям ефективності у підлітка, і через ці фактори також корелювало з ризиком електронної залежності.

Що найважливіше, схильність батьків до зловживання Інтернетом виявилася важливим прогнозуючим фактором непевного стилю прихильності, який батьки формують у стосунках з дитиною. Це означає, що дорослі, які зловживають електронними медіа, встановлювали з підлітками менш безпечні стосунки, а це, у свою чергу, лежало в основі (прямо чи опосередковано) усіх значущих детермінант ризику зловживання новими технологіями підлітками.¹⁷

Не можна перетворювати спорт зі способу фізичного виховання дітей у спосіб боротьби за особистий успіх, не можна ділити дітей на здібних і нездар до спорту, не можна розпалювати нездоровий потяг навколо боротьби за гідність школи.

В. Сухомлинський

¹⁷ Profilaktyka, diagnoza i terapia e-uzależnień wśród dzieci i młodzieży. Praktyczny podręcznik dla specjalistów pracy z dziećmi i ich rodzinami. Anna Wojtkowska, Agata Gąsiorowska (Fundacja Badań Społecznych, 2024). Warszawa: Wydawnictwo Liberi Libri, 2024. www.LiberiLibri.pl. ISBN: 978-83-63487-69-0.DOI: 10.47943/lib.9788363487690.

Для підлітків, з огляду на їхні фізичні та психічні особливості в період розвитку, важливим засобом сприяння їхньому здоровому зростанню є спорт. Дослідження також вказують на те, що спорт може покращити здатність підлітків до самоконтролю та емоційну самоефективність. Задоволення від фізичної активності сприймається як позитивний емоційний досвід, який не тільки сприяє загальному розвитку підлітків, а й істотно покращує якість їхнього життя. Більше того, фізична активність допомагає зменшити неприємні емоції, які можуть сприяти зловживанню ПАР та інформаційними технологіями.

Підлітки, які більше люблять фізичні вправи, як правило, щасливіші та мають вищу самоефективність і впевненість у собі, що допомагає їм давати раду таким складним емоціям, як смуток і тривога, та вести більш активний і здоровий спосіб життя. Ці конструктивні зміни в психічному здоров'ї можуть робити підлітків більш мотивованими до подолання викликів та труднощів у реальному житті¹⁸.

Однією зі сфер, яка останнім часом привертає все більшу увагу, є участь у спорті в контексті профілактики зловживання ПАР серед молоді та цифрового узалежнення. Однак також визнається, що заняття спортом можуть мати потенційно шкідливий вплив на дітей та молодь (наприклад, надмірні вимоги та очікування, що перевищують фізичну та/або емоційну зрілість, негативна участь дорослих, ризик травмування).

Пік занять спортом для більшості людей припадає на період передпідліткового та підліткового віку, після чого рівень участі має тенденцію до зниження під час переходу до ранньої дорослості та протягом усього подальшого життя. Оскільки дослідження, як правило, не охоплюють дітей та молодь саме в той період, коли починається вживання ПАР, і коли рівень занять спортом є найвищим, тому залишається дискусійним, чи надають заняття спортом якийсь захисний ефект для дітей та молоді¹⁹.

Залежність від фізичних вправ (exercise addiction, EA) є новою проблемою в спортивній психології та громадському здоров'ї, особливо серед підлітків, населення, яке переживає критичні фази фізичного та психологічного розвитку. Хоча регулярна фізична активність загальноновизнана за її глибокі переваги, включаючи поліпшення серцево-судинного здоров'я, поліпшення психічного благополуччя та зниження ризику хронічних захворювань, надмірна фізична активність може перейти в настирливу поведінку зі шкідливими наслідками.²⁰

Узалежнення від фізичних вправ (exercise addiction, exercise dependence, obligatory exercise, compulsive exercise, and excessive exercise) характеризується надмірними та нав'язливими тренуваннями, які в решті решт призводять до фізичного та психологічного дистресу. Результати багатьох досліджень вказують на те, що дуже високий відсоток фізично активних підлітків стурбовані також зовнішнім виглядом тіла і мають нав'язливі риси, пов'язані з харчовою поведінкою.

Проблемну поведінку легко спостерігати, наприклад, у підгрупах регулярних відвідувачів тренажерних залів, представників таких видів спорту як важка атлетика/бодібілдинг, біг на довгі

¹⁸ Shan L, Che X, Wang H, Li A, Ma N and Shui Y (2025) Relationship between soccer physical activity enjoyment and internet addiction among adolescents: the chain mediating effect of emotional self-efficacy and athlete participation. *Front. Psychol.* 16:1557282. doi: 10.3389/fpsyg.2025.1557282.

¹⁹ Kwan M, Bobko S, Faulkner G, Donnelly P, Cairney J. Sport participation and alcohol and illicit drug use in adolescents and young adults: a systematic review of longitudinal studies. *Addict Behav.* 2014 Mar;39(3):497-506. doi: 10.1016/j.addbeh.2013.11.006. Epub 2013 Nov 10. PMID: 24290876)

²⁰ Mayolas-Pi C, Sitko S, Pano-Rodriguez A, Lopez-Laval I, Reverter-Masia J, Legaz-Arrese A. Exercise addiction and psychosocial health risks among adolescent athletes: Focus on sport type and performance level. *J Behav Addict.* 2025 Apr 1;14(2):1095-1106. doi: 10.1556/2006.2025.00024. PMID: 40168079; PMCID: PMC12231450.

дистанції та комбіновані способи витривалості (напр., дуатлон, триатлон, «залізний чоловік» (Ironman)), а також у людей з розладами харчової поведінки (РХП), порушеннями образу тіла або розладами залежності²¹.

Рівень поширеності залежності від фізичних вправ у всьому світі коливається від 3% до 9% серед різних видів спорту та тих, хто займається фізичними вправами. Міжкультурне дослідження показників поширеності підліткової поведінки узалежнення показало, що зловживання фізичними вправами було другим у статистиці адиктивної поведінки: 27% в іспанській вибірці (середній вік: 14,9 років), в італійській молодіжній вибірці (віком: 13-20 років) виявлено 8,5% з ризиком зловживання фізичними вправами. Частка поширеності для тих учасників, які піддаються ризику узалежнення, становила 4,0% серед учнів спортивних шкіл та 8,7% серед відвідувачів фітнес центрів.

Узалежнення від фізичних вправ і невпорядковане харчування часто з'являються разом, і обидва були концептуалізовані як поведінкові залежності. Ці два розлади мають спільні риси, такі як компульсивність, перфекціонізм та невротизм, і можуть бути первинними чи другорядними один щодо одного²².

Більшість експертів сходяться на думці, що неадаптивні вправи – це багатовимірне явище, що включає унікальні якісні особливості щодо: релевантності/доречності діяльності (ставлення до вправ або тренувань, нав'язливі аспекти, заклопотаність), контролю поведінки (втрата контролю, примус, драйв або переконливі аспекти, жорсткість), умов практики (навіть коли є втома, хвороба або травма), центральності поведінки (пріоритет, втручання в особисте та соціальне життя, конфлікти з обов'язками), шкідливих наслідків (виснаження, хвороба, травми, суб'єктивне нездужання, соціальний конфлікт) та симптомів тривоги (поганий настрій, коли є перешкода для вправ, почуття провини, коли тренування пропущено). Не виключено і кількісні особливості надмірного обсягу (тобто тип, тривалість, частота та інтенсивність фізичної активності), які навряд чи можна оцінити як патологію, не враховуючи, серед інших факторів, фізичний стан людей, стан здоров'я, вік та регулярний рівень тренувань.

У вказаному огляді визначено чотири ключові кореляти патологічних вправ у людей з РХП, зокрема: патологія харчування (проблеми з вагою та формою), регуляція афекту (покращення настрою та уникнення симптомів відміни), компульсивність (відсутність контролю, почуття провини та сприйняті негативні наслідки зупинки) та перфекціонізм/жорсткість²³.

²¹ Godoy-Izquierdo, Débora & Molina, María J. & Ceballos, Isabel & Mora, Clara. (2021). A Systematic Review on Exercise Addiction and the Disordered Eating-Eating Disorders Continuum in the Competitive Sport Context. *International Journal of Mental Health and Addiction*. 21. 10.1007/s11469-021-00610-2. DOI:10.1007/s11469-021-00610-2

²² Mayolas-Pi C, Sitko S, Pano-Rodriguez A, Lopez-Laval I, Reverter-Masia J, Legaz-Arrese A. Exercise addiction and psychosocial health risks among adolescent athletes: Focus on sport type and performance level. *J Behav Addict*. 2025 Apr 1;14(2):1095-1106. doi: 10.1556/2006.2025.00024. PMID: 40168079; PMCID: PMC12231450.

²³ Meyer C, Taranis L, Goodwin H, Haycraft E. Compulsive exercise and eating disorders. *Eur Eat Disord Rev*. 2011 May-Jun;19(3):174-89. doi: 10.1002/erv.1122. PMID: 21584911.

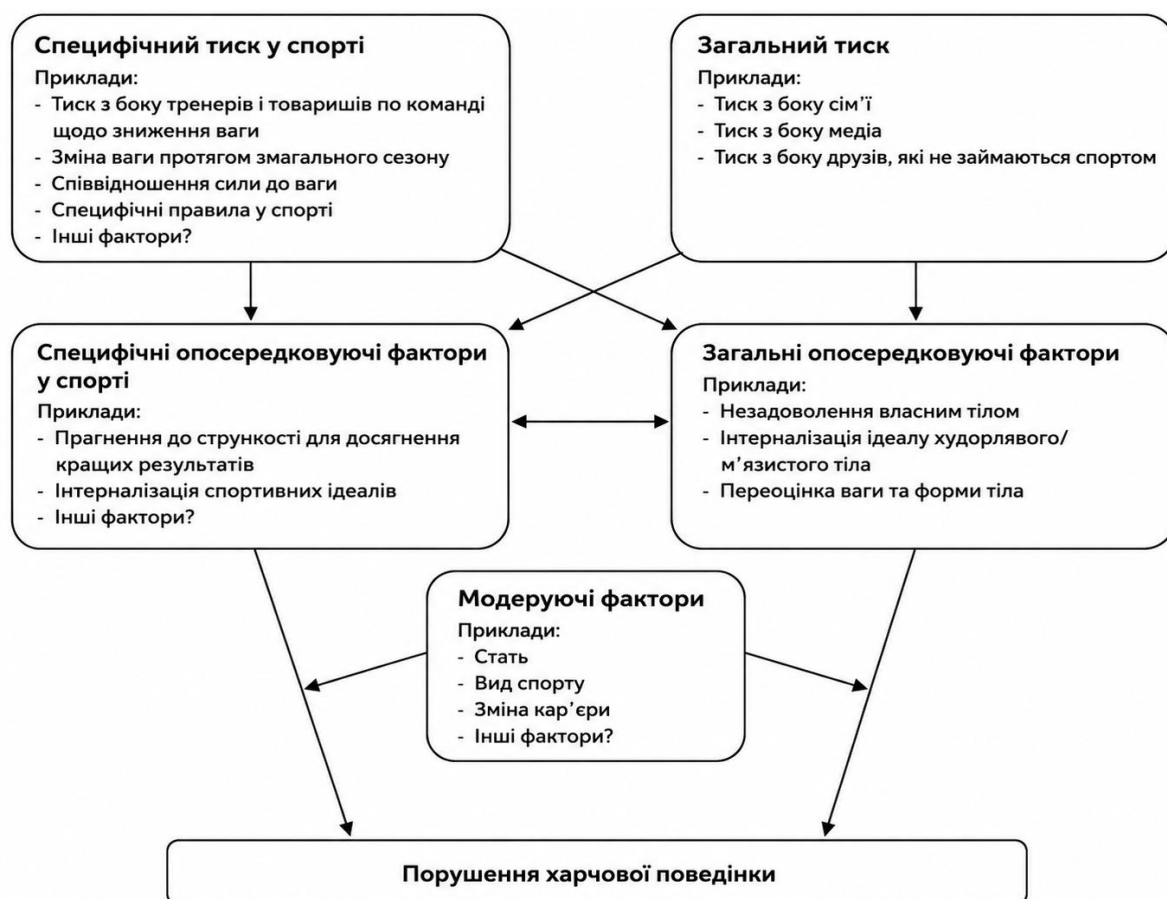


Рисунок 5. Потенційні гіпотези щодо спортивно-специфічних та загальних факторів ризику розладів харчової поведінки в елітних спортсменів²⁴

Проблемна фізична поведінка пов'язана не тільки з психологічними дефіцитами, але й зі значними фізичними ризиками для здоров'я, такими як відносний дефіцит енергії в спорті (energy deficiency in sport, RED-S), травми від надмірного використання та порушення відновлення. RED-S, що характеризується дисбалансом енергії через надмірні тренування та неадекватне харчування, пов'язують з гормональною дисфункцією, зниженням щільності кісток та зниженням працездатності. Крім того, молоді люди, які демонструють настирливу поведінку під час фізичних вправ, частіше страждають від синдрому перетренованості, який включає хронічну втому, порушення сну та підвищений ризик травм опорно-рухового апарату.

Існує гіпотеза, що захисні фактори, засновані на сприйнятті ризику, з часом втрачають свій вплив, тоді як фактори ризику залишаються незмінними. Ця гіпотеза ґрунтується, зокрема, на нормалізації споживання певних речовин та на управлінні факторами ризику, присутніми в повсякденному житті підлітків. Вибір підлітків-спортсменів як досліджуваної групи показує, що участь у спорті сама по собі не усуває ризики, оскільки у всіх вікових категоріях, на жаль, спостерігається значне зростання вживання алкоголю та азартних ігор, хоча показники адиктивної поведінки залишаються нижчими за середній показник по Іспанії для підлітків.²⁵

²⁴ Fatt SJ, George E, Hay P, Jeacocke N, Gotkiewicz E, Mitchison D. An Umbrella Review of Body Image Concerns, Disordered Eating, and Eating Disorders in Elite Athletes. *J Clin Med*. 2024 Jul 16;13(14):4171. doi: 10.3390/jcm13144171. PMID: 39064211; PMCID: PMC11278087.

²⁵ Armenteros Mayoral, J.C.; Úbeda Sánchez, Á.M.; Álvarez-Rodríguez, J.; Álvarez Ferrándiz, D. Sport and Preventive Education: Keys to Reducing Drug Consumption Among Adolescents. *Youth* 2026, 6, 31. <https://doi.org/10.3390/youth6010031>.

У 2009 році результати опитування 2300 старшокласників, опубліковані в журналі «*Journal of Child & Adolescent Substance Abuse*», показали, що спортсмени старших класів у Сполучених Штатах частіше вживають ПАР, ніж їхні однолітки, і мають більший ризик зловживання цими речовинами. Зокрема, приблизно 57% спортсменів старших класів зізналися у вживанні алкоголю «протягом попереднього місяця».

Безсумнівно, що для досягнення успіху у спорті будь-якому спортсмену потрібні виняткова відданість справі, наполегливість та стійкість, особливо під час переходу зі старшої школи до коледжу та далі. Однак стрес, який відчувають більшість спортсменів, виступаючи на високому рівні, часто ставить під сумнів цей делікатний баланс між психічною стійкістю та психічним здоров'ям. Систематичні огляди показують, що поширеність психічних розладів (наприклад, депресивних, тривожних) серед «елітних» (тобто студентів коледжу, олімпійських спортсменів) та населення загалом є подібною. Однак спортивні психіатри виявили, що травми, невдалі результати та вихід на пенсію (особливо достроковий) наражають спортсменів на більший ризик розвитку нездорових механізмів подолання труднощів та моделей мислення.

Чи може стрес від легкої атлетики посилювати ризик зловживання ПАР? Коротка відповідь – так. У 2020 році огляд літератури про зловживання ПАР від підлітків до спортсменів елітного рівня, проведений у Східному Мічиганському університеті, свідчить про те, що багато спортсменів стикаються з великим тиском, прагнучи досягти успіху «будь-якою ціною». Майже 57% респондентів визнали, що вживають препарати, що покращують спортивні результати (Pressure Equipment Directive, PED), такі як анаболічні стероїди, стимулятори, еритропоетин (EPO) та гормон росту людини (HGH). Крім того, в результатах опитування 800 спортсменів (як чинних, так і тих, що завершили кар'єру), проведене Антидопінговим агентством США (USADA) у 2017 році, приблизно 48% респондентів вважали, що громадськість сприйматиме їх негативно, якщо вони зазнають невдачі у своєму виді спорту; близько 61% опитаних вважали, що громадськість дбає про них лише як про «переможців». Зростання зловживання допоміжними засобами (PED) серед спортсменів старших класів викликало значне занепокоєння Американської академії педіатрії (AAP). Педіатри помічають, що спортсмени молодшого віку відчувають подібний тиск щодо успіху на шкоду своєму розвитку та особистому благополуччю. У 2013 році дослідження Partnership Attitude Tracking Study (PATs) показало, що 11% підлітків повідомили про вживання синтетичного гормону росту, що вдвічі більше, ніж у 2012 році. Це дослідження також виявило, що вживання анаболічних стероїдів серед спортсменів старших класів, особливо чоловіків, зросло з 5% до 7% за той самий період часу.

Члени сім'ї також відіграють важливу роль у посиленні негативного тиску, з яким можуть зіткнутися молоді спортсмени, як свідчать результати, опубліковані в опитуванні GOALS 2015 року, в якому взяли участь понад 21 000 спортсменів Національної коледжної спортивної асоціації (NCAA). У цьому дослідженні спортсмени повідомляли про «високі батьківські/сімейні очікування щодо гри в коледжних та/або професійних олімпійських видах спорту, які почалися в молодому віці» як про основний стресовий фактор. Реальність така, що менше ніж 2% усіх спортсменів коледжів грають професійно або беруть участь в Олімпійських іграх. Гра в коледжі сама по собі є конкурентним викликом. Нещодавні дані, опубліковані NCAA, підтвердили, що майже 8 мільйонів студентів займалися спортом у старших класах з 2018 по 2019 рік, але лише 495 000 (близько 6%) продовжили змагатися в коледжі, пов'язаному з NCAA.

Чи то у старшій школі, чи в коледжі, чи після них, одним із головних шляхів до зловживання ПАР, а саме опіоїдами, є отримання спортивної травми. «На щастя, через травми я пропустив лише одну гру за свою понад сорокарічну кар'єру гравця в коледжний футбол. У середній школі я почав

вчитися «грати крізь біль», як це роблять багато спортсменів». У 2014 році поздовжнє опитування показало, що приблизно 21% спортсменів-підлітків та 14% спортсменок-підлітків щорічно отримують спортивні травми.

«Протягом моєї п'ятирічної кар'єри в коледжі Гілсдейл, я пам'ятаю, як грав, переживши численні забої кісток, гусиний бурсит, тендиніт надколінка, численні розтягнення зв'язок гомілковостопного суглоба I ступеня, розтягнення зв'язок правого гомілковостопного суглоба II/III ступеня, розтягнення зв'язок правої згинальної кістки II ступеня, частковий розрив підколінного сухожилля, численні «защемлення» пальців та численні поколювання плеча. Балансування між потребою «грати крізь біль» та потребою відпочивати та відновлюватися було постійним викликом, оскільки футбол так глибоко вкорінився в моїй особистості, як і спорт для багатьох спортсменів».

Основною причиною смертей від передозування наркотиками у Сполучених Штатах є опіоїди, кількість яких зросла в 4 рази з 16 849 у 1999 році до 70 237 у 2017 році. Серед підлітків-спортсменів опитування 2014 року показало, що чоловіки частіше приймають рецептурні препарати, зловживають ними (тобто «кайфують») та неправильно вживають (тобто «приймають занадто багато») опіоїдів порівняно з однолітками, які не займаються спортом. У 2020 році систематичний огляд показав, що спортсмени старших класів також мають ризик вживання опіоїдів протягом життя на рівні 28-46%. Щодо того, як більшість підлітків отримують безрецептурні опіоїди, огляд 2015 року показав, що майже 53% підлітків віком від 12 років отримали їх «безкоштовно» від члена сім'ї чи друга, який часто мав рецепт.

Хоча все більше фахівців, пов'язаних зі спортом, визнають проблеми з психічним здоров'ям, з якими можуть стикатися багато спортсменів від підліткового віку до коледжу, ця відкрита розмова повинна продовжуватися. Тиск, який часто відчувають елітні спортсмени, такий як прагнення до успіху та перемоги, поширюється на підлітків, які також відчувають сімейний тиск щодо занять спортом у коледжі та після нього. Наркотичні речовини, канабіс, алкоголь та опіоїди, також дедалі більше впливають на молодих спортсменів. Тому, під час консультивання молодих спортсменів клініцисти повинні звертати увагу на їхні цілі (тобто спорт проти життя після спорту) та обговорювати будь-які конфлікти між особистими цінностями та поведінкою, пов'язаною з ПАР, з якими вони можуть стикатися. Мабуть, найважливіше, що можуть зробити клініцисти, члени сімей та члени громад для вирішення проблеми зловживання ПАР, це заохочення самооцінки/ефективності. Тобто, важливо напрацьовувати стратегії, завдяки яким спортсмени будуть відчувати/знати, що вони «достатньо хороші», і що «перемога» або «успіх» не повинні залежати від неналежного вживання речовин, а радше від наполегливої праці та рішучості. Важливо також своєчасно лікувати потенційні супутні психічні розлади, такі як депресія, зокрема, яка спостерігається приблизно у 25% спортсменів коледжів²⁶.

ВИСНОВКИ

Російське вторгнення в Україну створило значний тягар для психічного здоров'я українських підлітків, оскільки підлітки, які пережили війну, частіше мають позитивний результат на посттравматичний стресовий розлад, депресію, тривогу, розлади, пов'язані зі вживанням ПАР та розлади харчової поведінки. Враховуючи, що підлітки та молодь – це найбільш ранима, чутлива і найбільш чесна група суспільства, вони є його дзеркалом і потенційним дороговказом. Адиктивна

²⁶ Schukow C. Addiction, substance use, and pressure among adolescent through collegiate athletes-why we need to keep talking. *HPHR*. 2021;50. 10.54111/0001/WW5. <https://bcphr.org/50-article-schukow/>

поведінка є сигналом про порушений баланс. Активність у цифровому просторі, спорт, як і багато інших видів діяльності, не є апріорі добрими чи поганими, але вони мають потенціал приносити як позитивні, так і негативні наслідки. Ризики, пов'язані з соціальними медіа, участю у спорті чи зловживання ПАР можуть бути пов'язані з взаємодією в групі однолітків та/або з ширшими суспільними контекстами. Соціальна екологія передбачає, що екологічні підсистеми, такі як соціальне середовище, сімейне середовище, шкільне середовище, стосунки з однолітками можуть як підсилювати, так і пом'якшувати ефекти кумулятивного екологічного ризику.

Регулярне напрацювання відповідних системних стратегій, може сприяти превенції хімічних та поведінкових узалежнень та покращувати довгострокові траєкторії психічного здоров'я підлітків та молоді.

КЛІНІКО-ІМУНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕБІГУ COVID-19 ТА МУЛЬТИСИСТЕМНОГО ЗАПАЛЬНОГО СИНДРОМУ У ДІТЕЙ, АСОЦІЙОВАНОГО ІЗ SARS-COV-2

CLINICAL AND IMMUNOLOGICAL FEATURES OF COVID-19 AND MULTISYSTEM INFLAMMATORY SYNDROME IN CHILDREN ASSOCIATED WITH SARS-COV-2

Литвин Галина Орестівна, доцент, к.м.н., головний позаштатний експерт з дитячих інфекційних хвороб ДООЗ ЛОДА, доцент кафедри дитячих інфекційних хвороб ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького», golytvyn2012@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6902-1024>

Стасів Марія Володимирівна, доктор філософії, асистент кафедри дитячих інфекційних хвороб ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького», mariatanchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7110-0557>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.15>

Анотація. Пандемія COVID-19, спричинена SARS-CoV-2, зумовила необхідність поглибленого вивчення особливостей перебігу захворювання у дітей. Попри переважно легший перебіг інфекції у педіатричній популяції, у частини пацієнтів розвиваються тяжкі форми COVID-19, пневмонії, порушення дихальної функції та мультисистемний запальний синдром, асоційований із SARS-CoV-2.

Мета дослідження — удосконалити діагностику та прогнозування різних варіантів перебігу COVID-19 і мультисистемного запального синдрому у дітей.

У дослідженні обстежено 143 дитини віком від 1 до 18 років, з яких 110 мали COVID-19, а 33 — мультисистемний запальний синдром, асоційований із SARS-CoV-2. Встановлено зв'язок між віком дитини та тяжкістю перебігу COVID-19. Найчастішими клінічними проявами були гарячка, загальна слабкість, зниження апетиту, кашель, задишка та симптоми з боку шлунково-кишкового тракту. У пацієнтів із тяжким перебігом COVID-19 частіше виявляли підвищення рівнів СРП, прокальцитоніну, IL-6, IL-10, Д-димеру та порушення показників коагуляції.

У дітей із мультисистемним запальним синдромом переважали гарячка, висип, ураження слизових оболонок, діарея, біль у животі, підвищення маркерів запалення та Д-димеру. Визначено фактори, що можуть впливати на ризик тяжкого перебігу COVID-19, розвитку пневмонії та ураження коронарних судин при МЗС^{1,2,3,4,5,6,7}.

¹ P. Zimmermann and N. Curtis, "Coronavirus infections in children including COVID-19: An overview of the epidemiology, clinical features, diagnosis, treatment and prevention options in children," *Pediatr. Infect. Dis. J.*, vol. 39, no. 5, pp. 355–368, 2020, doi: 10.1097/INF.0000000000002660.

² S. Flaxman *et al.*, "Estimating the effects of non-pharmaceutical interventions on COVID-19 in Europe," vol. 584, no. August, 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2405-7.

³ C. R. Consiglio *et al.*, "The Immunology of Multisystem Inflammatory Syndrome in Children with COVID-19," *Cell*, vol. 183, no. 4, pp. 968–981.e7, 2020, doi: 10.1016/j.cell.2020.09.016.

⁴ T. E. Waseem M, Shariff MA, Lim CA, Nunez J, Narayanan N, Patel K, "Multisystem Inflammatory Syndrome in Children," *West J Emerg Med.*, vol. 23(4):505–, pp. 505–513, doi: 10.5811/westjem.2022.3.55325.

⁵ World Health Organization Europe (WHO Europe), "COVID-19 epidemiological update," 2024. .

⁶ Centers for Disease Control and Prevention, "MIS-C and COVID-19 clinical information," 2024. <https://www.cdc.gov>.

⁷ World Health Organization Europe (WHO Europe), "Statement on the fifteenth meeting of the IHR (2005) Emergency Committee regarding COVID-19," 2026. <https://www.who.int>.

Отримані результати мають практичне значення для вдосконалення діагностики, прогнозування перебігу захворювання та своєчасного виявлення ускладнень у дітей.

Ключові слова: COVID-19, мультисистемний запальний синдром, SARS-CoV-2, діти, інфекція, IgM, IgA, IgG, цитокіни, IL-6, IL-10, IL-2, гострий респіраторний дистрес-синдром, механічна вентиляція, коагуляція, логістична регресія, прогнозування.

Abstract. The COVID-19 pandemic caused by SARS-CoV-2 highlighted the need for a detailed study of the clinical course of the disease in children. Although pediatric patients generally experience milder infection, some children develop severe COVID-19, pneumonia, respiratory impairment, and multisystem inflammatory syndrome associated with SARS-CoV-2.

The aim of the study was to improve the diagnosis and prediction of different clinical courses of COVID-19 and SARS-CoV-2-associated multisystem inflammatory syndrome in children.

The study included 143 children aged 1 to 18 years, among whom 110 had COVID-19 and 33 had multisystem inflammatory syndrome associated with SARS-CoV-2. A relationship was established between the child's age and the severity of COVID-19. The most common clinical manifestations were fever, general weakness, loss of appetite, cough, dyspnea, and gastrointestinal symptoms. In children with severe COVID-19, increased levels of CRP, procalcitonin, IL-6, IL-10, D-dimer, and coagulation abnormalities were observed more frequently.

In patients with multisystem inflammatory syndrome, fever, rash, mucosal involvement, diarrhea, abdominal pain, elevated inflammatory markers, and increased D-dimer levels predominated. The study identified factors associated with the risk of severe COVID-19, pneumonia, and coronary artery involvement in children with MIS-C^{8,9,10,11,12,13,14}.

The obtained results are of practical importance for improving diagnosis, predicting disease progression, and timely detecting complications in pediatric patients.

Keywords: COVID-19, Multisystem inflammatory syndrome, SARS-CoV-2, children, infection, IgM, IgA, IgG, cytokines, IL-6, IL-10, IL-2, acute respiratory distress syndrome, mechanical ventilation, coagulation, logistic regression, prognosis.

ВСТУП

Актуальність теми. Пандемія коронавірусної інфекції спричиненої SARS-CoV-2, стала безпрецедентним викликом для систем охорони здоров'я в усьому світі та зумовила необхідність поглибленого вивчення її впливу на різні вікові групи населення, зокрема на дітей. COVID-19

⁸ P. Zimmermann and N. Curtis, "Coronavirus infections in children including COVID-19: An overview of the epidemiology, clinical features, diagnosis, treatment and prevention options in children," *Pediatr. Infect. Dis. J.*, vol. 39, no. 5, pp. 355–368, 2020, doi: 10.1097/INF.0000000000002660.

⁹ S. Flaxman *et al.*, "Estimating the effects of non-pharmaceutical interventions on COVID-19 in Europe," vol. 584, no. August, 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2405-7.

¹⁰ C. R. Consiglio *et al.*, "The Immunology of Multisystem Inflammatory Syndrome in Children with COVID-19," *Cell*, vol. 183, no. 4, pp. 968–981.e7, 2020, doi: 10.1016/j.cell.2020.09.016.

¹¹ T. E. Waseem M, Shariff MA, Lim CA, Nunez J, Narayanan N, Patel K, "Multisystem Inflammatory Syndrome in Children," *West J Emerg Med.*, vol. 23(4):505–, pp. 505–513, doi: 10.5811/westjem.2022.3.55325.

¹² World Health Organization Europe (WHO Europe), "COVID-19 epidemiological update," 2024. .

¹³ Centers for Disease Control and Prevention, "MIS-C and COVID-19 clinical information," 2024. <https://www.cdc.gov>.

¹⁴ World Health Organization Europe (WHO Europe), "Statement on the fifteenth meeting of the IHR (2005) Emergency Committee regarding COVID-19," 2026. <https://www.who.int>.

характеризується ураженням дихальних шляхів, шлунково-кишкового тракту, гарячкою, аносмією, агевзією та кон'юнктивітом¹⁵.

11 березня коронавірусна інфекція COVID-19 стала міжконтинентальною проблемою – розвинулася пандемія¹⁶.

У дітей спектр клінічних проявів COVID-19 є різноманітним, від безсимптомного¹⁷ до критично тяжкого захворювання¹⁸. Серед обстежених дітей з SARS-CoV-2 відзначають: безсимптомний, легкий, середньо-тяжкий, тяжкий та критично-тяжкий перебіг хвороби, що становить 29,5 %, 56,4 %, 12,9 %, 1,2 % і 0 %, відповідно¹⁹.

Важливо відзначити, що в різні епідемічні періоди від 3,5 % до 7 % дітей потребували госпіталізації²⁰, у відділення інтенсивної терапії – 0,8 %, смертність серед них становила близько 0,1 %²¹.

Серед дітей і підлітків найбільший відсоток госпіталізацій (4,6 %) був у пацієнтів віком до чотирьох років²². SARS-CoV-2 може призвести до тяжких ускладнень включаючи пневмонію, гострий респіраторний дистрес-синдром (ГРДС) та розвиток мультисистемного запального синдрому (МЗС), незалежно від тяжкості перебігу хвороби²³. Згідно з даними літератури, частота виявлення МЗС у дітей становить від 5 до 8 випадків на 1 000 000 населення, а рівень смертності не перевищує 1%^{24,25}. Більшість дітей, в яких розвивається МЗС, раніше були здоровими, проте ожиріння є найчастішою супутньою патологією²⁶.

Попри швидке вивчення геному вірусу, у 2020 році стало відомо про здатність вірусу до мутації та виникнення нових варіантів вірусу²⁷.

Від початку пандемії до березня 2024 року, світові статистичні дані вказують на 703 872 937 випадків зараження COVID-19 та 7 003 575 смертей. В Україні зафіксовано 5 557 995 випадків інфікування SARS-CoV-2, з них 112 418 закінчилися летально. У дітей діагностовано 1,5 мільйона випадків COVID-19²⁸.

¹⁵ P. C. Y. Woo, S. K. P. Lau, Y. Huang, and K. Y. Yuen, "Coronavirus diversity, phylogeny and interspecies jumping," *Exp. Biol. Med.*, vol. 234, no. 10, pp. 1117–1127, 2009, doi: 10.3181/0903-MR-94.

¹⁶ V. E. Hillary and S. A. Caesar, "An update on COVID-19: SARS-CoV-2 variants, antiviral drugs, and vaccines," *Heliyon*, vol. 9, no. 3, p. e13952, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13952.

¹⁷ R. Mungmunpuntipantip and V. Wiwanitkit, "Chest computed tomography in children with COVID-19," *Pediatr. Radiol.*, vol. 50, no. 7, p. 1018, 2020, doi: 10.1007/s00247-020-04676-3.

¹⁸ D. Bixler et al., "SARS-CoV-2–Associated Deaths Among Persons Aged <21 Years — United States, February 12–July 31, 2020," *MMWR. Morb. Mortal. Wkly. Rep.*, vol. 69, no. 37, pp. 1324–1329, 2020, doi: 10.15585/mmwr.mm6937e4.

¹⁹ E. Berksoy et al., "Clinical and laboratory characteristics of children with SARS-CoV-2 infection," *Pediatr. Pulmonol.*, vol. 56, no. 12, pp. 3674–3681, 2021, doi: 10.1002/ppul.25654.

²⁰ COVID-NET, "A Weekly Summary of U.S. COVID-19 Hospitalization Data," Accessed October 4, 2020 (https://gis.cdc.gov/grasp/covidnet/covid19_3.html).

²¹ P.-N. Jone et al., "SARS-CoV-2 Infection and Associated Cardiovascular Manifestations and Complications in Children and Young Adults: A Scientific Statement From the American Heart Association," *Circulation*, vol. 145, no. 19, May 2022, doi: 10.1161/CIR.0000000000001064.

²² F. Efendi et al., "Predictors of Mortality Among Children with Confirmed and Suspected Cases of COVID-19 in East Java, Indonesia," *J. Multidiscip. Healthc.*, vol. 16, no. February, pp. 355–362, 2023, doi: 10.2147/JMDH.S391917.

²³ C. B. Crayne, S. Albeituni, K. E. Nichols, and R. Q. Cron, "The immunology of macrophage activation syndrome," *Front. Immunol.*, vol. 10, no. FEB, pp. 1–11, 2019, doi: 10.3389/fimmu.2019.00119.

²⁴ R. Mungmunpuntipantip and V. Wiwanitkit, "Chest computed tomography in children with COVID-19," *Pediatr. Radiol.*, vol. 50, no. 7, p. 1018, 2020, doi: 10.1007/s00247-020-04676-3.

²⁵ D. Bixler et al., "SARS-CoV-2–Associated Deaths Among Persons Aged <21 Years — United States, February 12–July 31, 2020," *MMWR. Morb. Mortal. Wkly. Rep.*, vol. 69, no. 37, pp. 1324–1329, 2020, doi: 10.15585/mmwr.mm6937e4.

²⁶ T. Radia et al., "Multi-system inflammatory syndrome in children & adolescents (MIS-C): A systematic review of clinical features and presentation," *Paediatr. Respir. Rev.*, vol. 38, pp. 51–57, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.prrv.2020.08.001.

²⁷ P. Forster, L. Forster, C. Renfrew, and M. Forster, "Phylogenetic network analysis of SARS-CoV-2 genomes," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 117, no. 17, pp. 9241–9243, 2020, doi: 10.1073/pnas.2004999117.

²⁸ Worldometer, "Coronavirus Disease Cases," no. June, p. Corona Virus, 2021, [Online]. Available: <https://www.worldometers.info/coronavirus/>.

За період пандемії COVID-19 на Львівщині виявлено 334 136 хворих, з них 6 931 летальних випадків²⁹.

Згідно з даними МОЗ України за 2023 рік, діти становили близько 20 % всіх випадків COVID-19³⁰.

Попри втрату статусу пандемії 5 травня 2023 року, SARS-CoV-2 продовжує чинити суттєвий вплив на стан здоров'я населення, соціальне благополуччя та економічні процеси. Вірус, що зазнає постійних мутацій, залишається актуальною проблемою громадського здоров'я, яка потребує подальшого наукового вивчення³¹. Крім того, скасування пандемічного статусу сприяло певному зниженню клінічної настороженості як серед населення, так і серед медичних працівників, що може негативно впливати на своєчасність діагностики та ефективність лікування як COVID-19, так і асоційованих із ним станів.

У цьому контексті дослідження клініко-імунологічних особливостей перебігу SARS-CoV-2-інфекції та мультисистемного запального синдрому, асоційованого з COVID-19 у дітей, є важливим для вдосконалення діагностичних критеріїв, оптимізації лікувальних стратегій та підвищення якості медичної допомоги.

Таким чином, незважаючи на формальне завершення пандемії, COVID-19 та асоційований із ним мультисистемний запальний синдром залишаються значущою науковою та практичною проблемою сучасної педіатрії, що потребує подальших фундаментальних і клінічних досліджень.

Мета дослідження. Удосконалити діагностику та прогнозування різних варіантів перебігу COVID-19 та МЗС, асоційованого з SARS-CoV-2 у дітей.

Завдання дослідження:

1. Встановити частоту клінічних ознак COVID-19 та МЗС, асоційованого з SARS-CoV-2 у госпіталізованих дітей з урахуванням їх віку та тяжкості перебігу хвороби.
2. Дослідити гематологічні, біохімічні показники та маркери запалення крові у дітей з COVID-19 та МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 з урахуванням віку та тяжкості перебігу хвороби.
3. Проаналізувати результати досліджень Д-димеру, як одного з основних факторів COVID-19-асоційованої коагулопатії у пацієнтів досліджуваних груп з урахуванням віку та тяжкості перебігу хвороби.
4. Вивчити динаміку показників гуморального імунітету у дітей з COVID-19 та МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 з урахуванням віку та тяжкості перебігу хвороби.
5. Проаналізувати результати насичення крові киснем, рентгенографії органів грудної клітки, ультразвукового дослідження серця, легень та органів черевної порожнини у дітей з COVID-19 та МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 з урахуванням віку та тяжкості перебігу хвороби.
6. Охарактеризувати прогностичні фактори ризику розвитку важкого перебігу SARS-CoV-2, пневмонії при COVID-19 та ураження коронарних судин у дітей з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2.

Об'єкт дослідження: пацієнти з середньо-тяжким та тяжким перебігом COVID-19 та пацієнти з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2.

Предмет дослідження: клінічні особливості COVID-19 та МЗС, асоційованого з SARS-CoV-2 у дітей; показники IL-6, IL-2, IL-10, прокальцитоніну, СРП, тропоніну I, Д-димеру, феритину,

²⁹ Ц. громадського здоров'я М. України, "COVID-19 на Львівщині," <https://phc.org.ua/news/grip-covid-19-ta-grvi-z-pochatku-epidsezonu-zakhvorilo-blizko-25-mln-osib>.

³⁰ Ц. громадського здоров'я М. України, "COVID-19 на Львівщині," <https://phc.org.ua/news/grip-covid-19-ta-grvi-z-pochatku-epidsezonu-zakhvorilo-blizko-25-mln-osib>.

³¹ C. B. Crayne, S. Albeituni, K. E. Nichols, and R. Q. Cron, "The immunology of macrophage activation syndrome," *Front. Immunol.*, vol. 10, no. FEB, pp. 1–11, 2019, doi: 10.3389/fimmu.2019.00119.

коагулограми та протеїнограми; кінетика IgM, IgA та IgG до SARS-CoV-2 у сироватці крові; рентгенологічні та сонографічні критерії ураження легень та серця у пацієнтів досліджуваної групи.

Методи дослідження: загальноклінічні (опитування, огляд, об'єктивне обстеження, загальний аналіз крові), біохімічні (СРП, прокальцитонін, тропонін І, Д-димер, феритин, коагулограма, протеїнограма), серологічні (ІФА визначення специфічних IgM, IgA, IgG-N та IgG-S до SARS-CoV-2, IL-2, IL-6, IL-10), молекулярно-біологічні (ПНК SARS-CoV-2), інструментальні (пульсоксиметрія, рентгенографія органів грудної клітки, ультразвукове дослідження легень, серця та органів черевної порожнини – УЗД), статистичні (методи параметричної та непараметричної статистики з обчисленням критеріїв Шапіро-Уїлка, U-критерій Манна-Уїтні, ксі-квадрат Пірсона, Спирмена, Фішера, статистичні обрахунки проводилися із використанням програмного забезпечення RStudio v. 1.4.1106. Метод логістичної регресії з покроковим включенням достовірних ознак за методом Вальда, розрахунки проводилися із використанням програмного забезпечення RStudio v. 1.1.442 та R Commander v.2.4-4).

1. ПАНДЕМІЯ COVID-19: ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ПЕДІАТРІЇ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

1.1 Еволюція коронавірусів: відкриття шляхів до розуміння генетичної динаміки

Наприкінці 30-х років 20 століття коронавіруси були встановлені як етіологічні чинники інфекцій респіраторного тракту у людей. Вперше вони виділені зі змивів з носової порожнини та описані англійськими вірусологами Д. Тайрелом та М. Біноєм у 1965 році³². У 1968 році визнано нову родину — Coronaviridae.

У 2003 році, після виникнення тяжкого гострого респіраторного синдрому (Severe acute respiratory syndrome coronavirus - SARS)³³, який поширився з Азії по всьому світу, ВООЗ повідомила про ідентифікацію збудника. Надалі він отримав назву SARS коронавірус (SARS-CoV). Спалах атипової пневмонії тривав від листопада 2002 до липня 2003 року³⁴. Наукові дослідження підтвердили, що цей вірус зумів подолати міжвидовий бар'єр, переходячи від циветових котів на людину³⁵. З початку 2004 року у світі не було зафіксовано жодного випадку захворювання на SARS-CoV³⁶.

Найпоширеніші коронавіруси у людини, такі як 229E, NL63, OC43 і HKU1, зазвичай викликають легкі або помірні захворювання верхніх дихальних шляхів³⁷. Вчені активно досліджують структуру та властивості коронавірусів після кожного нового спалаху атипової пневмонії.

³² J. D. Almeida and D. A. Tyrrell, "The morphology of three previously uncharacterized human respiratory viruses that grow in organ culture.," J. Gen. Virol., vol. 1, no. 2, pp. 175–178, 1967, doi: 10.1099/0022-1317-1-2-175.

³³ C. Drosten et al., "Identification of a Novel Coronavirus in Patients with Severe Acute Respiratory Syndrome," N. Engl. J. Med., vol. 348, no. 20, pp. 1967–1976, 2003, doi: 10.1056/nejmoa030747.

³⁴ J. S. M. Peiris et al., "Coronavirus as a possible cause of severe acute respiratory syndrome," Lancet, vol. 361, no. 9366, pp. 1319–1325, 2003, doi: 10.1016/S0140-6736(03)13077-2.

³⁵ M. Wang et al., "SARS-CoV infection in a restaurant from palm civet," Emerg. Infect. Dis., vol. 11, no. 12, pp. 1860–1865, 2005, doi: 10.3201/eid1112.041293.

³⁶ M. O. R. Respirator, "Since 2004, there have not been any known cases of SARS reported anywhere in the world. The content in this PDF was developed for the 2003 SARS epidemic. But, some guidelines are still being used. Any new SARS updates will be posted on this Web site," Cdc, pp. 2003–2005, 2004.

³⁷ J. S. Kahn and K. McIntosh, "History and recent advances in coronavirus discovery," Pediatr. Infect. Dis. J., vol. 24, no. 11 SUPPL., pp. 223–227, 2005, doi: 10.1097/01.inf.0000188166.17324.60.

В кінці 2004 року був відкритий четвертий коронавірус у людини, відомий як коронавірус New Haven (NL63 або NL)³⁸. Дослідники з університету Гонконга виявили інший коронавірус у 2005 році, який отримав назву коронавірус людини – HKU1³⁹.

У вересні 2012 року був ідентифікований шостий штам коронавірусу у людини в Саудівській Аравії, що отримав назву "коронавірус людини Близького Сходу" (MERS-CoV). Цей вірус може передаватися від людини до людини, спричиняючи тяжкі ураження нижніх дихальних шляхів, зі смертністю від 20 %⁴⁰ до 43 %^{41,42}. MERS-CoV поширився на 27 країн⁴³.

Наприкінці 2019 року на території міста Ухань в провінції Хубей, Китай, виник спалах нової коронавірусної хвороби, що отримала назву COVID-19. Цей патоген швидко розповсюджувався, а кількість випадків захворювання в інших країнах світу стрімко зростала. Китайські науковці визначили й виокремили новий коронавірус — 2019 nCoV, який на 70 % генетично співпадав з вірусом SARS-CoV, викликаючи тяжку форму ГРДС. Зазначений вірус став загрозою на світовому рівні.

30 січня ВООЗ оголосила про міжнародну надзвичайну ситуацію у зв'язку з коронавірусом, на початку березня 2020 року розвинулася пандемія⁴⁴.

Коронавірусна хвороба 2019 (COVID-19), також відома як гострий респіраторний синдром, викликаний коронавірусом 2 типу (SARS-CoV-2), є вірусним антропонозним захворюванням з групи гострих респіраторних вірусних інфекцій, яке характеризується ураженням дихальних шляхів, шлунково-кишкового тракту, лихоманковим синдромом, аносмією, агевзією, кон'юнктивітом.

SARS-CoV-2 належить до родини Coronaviridae, роду Betacoronavirus, підроду Sarbecovirus (лінія B)⁴⁵. SARS-CoV-2 має певну мінливість форми — від круглої до овальної. Діаметр віріону SARS-CoV-2 становить 50–200 нм. Генوم SARS-CoV-2 - це одноланцюгові РНК (+) віруси, навколо нуклеокапсиду яких знаходиться білкова мембрана із зовнішньою оболонкою, що містить ліпіди. На поверхні віріону містяться шипоподібні відростки довжиною 20 нм — пепломери, які мають форму булави, що розширюється на дистальному кінці^{46,47,48}.

РНК кодує 4 основних структурних білки вірусу: S-білок – глікопротеїн, який формує шипи на поверхні вірусних часток; М-білок – мембранний; N-білок – нуклеокапсидний; Е-білок –

³⁸ J. S. Kahn and K. McIntosh, "History and recent advances in coronavirus discovery," *Pediatr. Infect. Dis. J.*, vol. 24, no. 11 SUPPL., pp. 223–227, 2005, doi: 10.1097/01.inf.0000188166.17324.60.

³⁹ S. K. P. Lau et al., "Coronavirus HKU1 and other coronavirus infections in Hong Kong," *J. Clin. Microbiol.*, vol. 44, no. 6, pp. 2063–2071, 2006, doi: 10.1128/JCM.02614-05.

⁴⁰ Osong Public Health and Research Perspectives, "Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus Outbreak in the Republic of Korea, 2015," *Osong Public Heal. Res. Perspect.*, vol. 6, no. 4, pp. 269–278, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.phrp.2015.08.006.

⁴¹ F. S. Alhamlan et al., "Case characteristics among Middle East respiratory syndrome coronavirus outbreak and non-outbreak cases in Saudi Arabia from 2012 to 2015," *BMJ Open*, vol. 7, no. 1, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1136/bmjopen-2016-011865.

⁴² World Health Organization., "Disease outbreak news. 24 February 2020. Middle East respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV) – The Kingdom of Saudi Arabia.," <https://www.who.int/csr/don/24-february-2020-mers-saudi-arabia/en/>. Accessed March 5, 2020.

⁴³ M. S. Nassar, M. A. Bakhrebah, S. A. Meo, M. S. Alsuaibeyl, and W. A. Zaher, "Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus (MERS-CoV) infection: epidemiology, pathogenesis and clinical characteristics," *Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci.*, vol. 22, no. 15, pp. 4956–4961, 2018, doi: 10.26355/eurrev_201808_15635.

⁴⁴ World Health Organization, "Coronavirus 2019 Disease (COVID-19) Situation Report - 32. 2020.," https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200221-sitrep-32-covid-19.pdf?sfvrsn=4802d089_2.

⁴⁵ H. J. Maier, E. Bickerton, and P. Britton, *Coronaviruses*, vol. 1282, no. 1. New York, NY: Springer New York, 2015.

⁴⁶ P. C. Y. Woo, S. K. P. Lau, Y. Huang, and K. Y. Yuen, "Coronavirus diversity, phylogeny and interspecies jumping," *Exp. Biol. Med.*, vol. 234, no. 10, pp. 1117–1127, 2009, doi: 10.3181/0903-MR-94.

⁴⁷ N. Zhu et al., "A Novel Coronavirus from Patients with Pneumonia in China, 2019," *N. Engl. J. Med.*, vol. 382, no. 8, pp. 727–733, 2020, doi: 10.1056/nejmoa2001017.

⁴⁸ "Coronaviruses with Special Emphasis on First Insights Concerning SARS," *Coronaviruses with Spec. Emphas. First Insights Concern. SARS*, vol. 49, no. 0, p. 6221, 2005, doi: 10.1007/b137625.

оболонковий. Білки N та S є основними імуногенними білками CoV^{49,50,51}. Білки N та S є основними імуногенними компонентами коронавірусу^{52,53,54,55}.

SARS-CoV-2 включає неструктурні білки – Nsp1-16, які відіграють важливу роль у життєдіяльності вірусу: Nsp1 сприяє обробці та реплікації вірусної РНК, Nsp2 регулює сигнальний шлях виживання клітини-господаря, Nsp3 розщеплює трансльований білок; Nsp5, Nsp6, Nsp12 та Nsp13 беруть участь у реплікації поліпротеїнів; Nsp7, Nsp8, Nsp9 поліпшують розташування Nsp12 та беруть участь у кеп-метилуванні мРНК вірусу, що є важливим механізмом для ухилення від імунного контролю та сприяє ефективній експресії генетичної інформації в клітині-господарі. Nsp11 і Nsp12, що містить РНК-залежну РНК-полімеразу (RdRp) є компонентами реплікації та транскрипції вірусу, а Nsp13 бере участь у транскрипції РНК і реплікації вірусу⁵⁶.

Як вказують генетичні дані⁵⁷, збудник COVID-19 взаємодіє з рецептором ангіотензин-перетворюючого ферменту 2 в людини (АПФ2)⁵⁸. SARS-CoV-2 використовує той самий рецептор клітинного входу – АПФ2, що і SARS-CoV. Відмінністю є здатність SARS-CoV-2 до більш щільної взаємодії з протеїном АПФ2, що забезпечує ефективніше проникнення в клітину-мішень⁵⁹.

Попри швидке вивчення геному вірусу, 28 квітня 2020 року стало відомо про здатність вірусу до мутації. Протягом пандемії SARS-CoV-2 еволюціонував, визначаючись синонімічною мутацією T8782C та несинонімічною мутацією C28144T⁶⁰. Адаптивні мутації в геномі, можуть впливати на патогенний потенціал SARS-CoV-2. Навіть невеликі зміни в амінокислотному складі можуть значно підвищити здатність вірусу уникати імунної системи. Під час еволюції SARS-CoV-2, адаптуючись до нових хазяїнів через мутації, виникають нові варіанти вірусу.

⁴⁹ M. Scudellari, "Coronavirus Piece By Piece," *Nature*, vol. 581, no. 7808, pp. 252–255, 2020, [Online]. Available: <https://search.proquest.com/docview/2406984769?accountid=26724> http://sfx.library.cdc.gov/cdc/?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:journal&genre=article&sid=ProQ:ProQ%3Ahealthcompleteshell&atitle=CORONAVIRUS+PIECE+BY+PIECE&title=Nature&is.

⁵⁰ L. Zhang et al., "Crystal structure of SARS-CoV-2 main protease provides a basis for design of improved a-ketoamide inhibitors," *Science* (80-.), vol. 368, no. 6489, pp. 409–412, 2020, doi: 10.1126/science.abb3405.

⁵¹ C. Wu et al., "Analysis of therapeutic targets for SARS-CoV-2 and discovery of potential drugs by computational methods," *Acta Pharm. Sin. B*, vol. 10, no. 5, pp. 766–788, 2020, doi: 10.1016/j.apsb.2020.02.008.

⁵² M. Scudellari, "Coronavirus Piece By Piece," *Nature*, vol. 581, no. 7808, pp. 252–255, 2020, [Online]. Available: <https://search.proquest.com/docview/2406984769?accountid=26724> http://sfx.library.cdc.gov/cdc/?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:journal&genre=article&sid=ProQ:ProQ%3Ahealthcompleteshell&atitle=CORONAVIRUS+PIECE+BY+PIECE&title=Nature&is.

⁵³ L. Zhang et al., "Crystal structure of SARS-CoV-2 main protease provides a basis for design of improved a-ketoamide inhibitors," *Science* (80-.), vol. 368, no. 6489, pp. 409–412, 2020, doi: 10.1126/science.abb3405.

⁵⁴ C. Wu et al., "Analysis of therapeutic targets for SARS-CoV-2 and discovery of potential drugs by computational methods," *Acta Pharm. Sin. B*, vol. 10, no. 5, pp. 766–788, 2020, doi: 10.1016/j.apsb.2020.02.008.

⁵⁵ K. Ramanathan et al., "Genomic characterisation and epidemiology of 2019 novel coronavirus: implications for virus origins and receptor binding," *Lancet*, vol. 2020, no. January, pp. 19–21, 2020.

⁵⁶ V. E. Hillary and S. A. Caesar, "An update on COVID-19: SARS-CoV-2 variants, antiviral drugs, and vaccines," *Heliyon*, vol. 9, no. 3, p. e13952, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13952.

⁵⁷ K. G. Andersen, A. Rambaut, W. I. Lipkin, E. C. Holmes, and R. F. Garry, "The proximal origin of SARS-CoV-2," *Nat. Med.*, vol. 26, no. 4, pp. 450–452, 2020, doi: 10.1038/s41591-020-0820-9.

⁵⁸ K. Ramanathan et al., "Genomic characterisation and epidemiology of 2019 novel coronavirus: implications for virus origins and receptor binding," *Lancet*, vol. 2020, no. January, pp. 19–21, 2020.

⁵⁹ P. Zimmermann and N. Curtis, "Coronavirus infections in children including COVID-19: An overview of the epidemiology, clinical features, diagnosis, treatment and prevention options in children," *Pediatr. Infect. Dis. J.*, vol. 39, no. 5, pp. 355–368, 2020, doi: 10.1097/INF.0000000000002660.

⁶⁰ P. Forster, L. Forster, C. Renfrew, and M. Forster, "Phylogenetic network analysis of SARS-CoV-2 genomes," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 117, no. 17, pp. 9241–9243, 2020, doi: 10.1073/pnas.2004999117.

В кінці 2020 року виявлено Alpha -варіант (B.1.1.7) з 23 мутаціями у геномі, зокрема в спайковому білку (S)^{61,62,63}. Beta (B.1.351), з'явився у жовтні 2020 року⁶⁴. Цей варіант має 9 мутацій у білку S, включаючи K417N, E484K і N501Y у рецептор-зв'язувальному домені (RBD), що сприяє проникненню вірусу у клітини господаря. Gamma (P.1), виявлений в Бразилії, має 17 мутацій, включаючи E484K, K417N і L184 у RBD білка S, і відомий своєю високою контагіозністю. Delta (B.1.617.2), характеризується 10 мутаціями, включаючи L452R та T19R у білку S, і призвів до другої смертельної хвилі COVID-19 в багатьох країнах⁶⁵. Omicron (B.1.1.529), з понад 18 621 мутаціями і в 2022 році став основною причиною COVID-19 у світі, з підваріантами BA.1, BA.2, BA.3, BA.4. і BA.5, серед яких підваріант XBB.1.5, відомий як "Kraken", має мутацію S486P, підвищуючи інфекційність вірусу. XE, рекомбінант BA.1 і BA.2 Omicron, з трьома мутаціями, спільно з підваріантами XD та XF, які мають генетичний матеріал Delta AY.4 і Omicron BA.1⁶⁶.

Варіанти SARS-CoV-2, Epsilon (B.1.427 і B.1.429), Zeta (P.2), Eta (B.1.525), Iota (B.1.526), Theta (P.3), Kappa (B.1.617.1), Lambda (C.37) та Mu (B.1.621), кожен з них має різні характеристики та мутації, що можуть впливати на ступінь загрози⁶⁷.

1.2. Епідеміологічні аспекти захворюваності на COVID-19 у дітей: висвітлення тенденцій та особливостей

Хвороба передається від людини до людини, включаючи безсимптомних та тих, хто має легкі клінічні ознаки, через краплі слини або безпосередній контакт⁶⁸. Основний механізм передачі – повітряно-краплинний через аерозолі, а також можливий і фекально-оральний. Передача вірусу здійснюється на відстані 1-2 м та при тривалому тісному контакті. Описаний і контактний-побутовий шлях передачі SARS-CoV-2 через контаміновані предмети побуту. Водночас дискутується аліментарний механізм передачі⁶⁹.

Вірус чутливий до ультрафіолетового випромінювання та нагрівання, інактивується при температурі 56 °C впродовж 30 хвилин, а на поверхні з неіржавної сталі, при температурі повітря 54,5°C, відбувається інактивація 90 % збудника приблизно за 36 хвилин. Важливо відзначити, що вірус може зберігати свою життєздатність при низьких температурах, включаючи значення нижче 0°C, і для його руйнування використовуються ліпідні розчинники, такі як 75 % етанол, хлорвмісний дезінфікуючий засіб, пероксиоцтова кислота та хлороформ, за винятком хлоргексидину⁷⁰.

⁶¹ V. E. Hillary and S. A. Ceasar, "An update on COVID-19: SARS-CoV-2 variants, antiviral drugs, and vaccines," *Heliyon*, vol. 9, no. 3, p. e13952, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13952.

⁶² S. E. Galloway, P. Paul, D. R. Maccannell, and M. A. Johansson, "Emergence of SARS-CoV-2 B.1.1.7 Lineage — United States," *MMWR Morb Wkly Rep*, vol. 70, no. 3, pp. 95–99, 2021, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm7003e2>.

⁶³ E. Volz et al., "Assessing transmissibility of SARS-CoV-2 lineage B.1.1.7 in England," *Nature*, vol. 593, no. 7858, pp. 266–269, 2021, doi: 10.1038/s41586-021-03470-x.

⁶⁴ H. Tegally et al., "Emergence and rapid spread of a new severe acute respiratory syndrome-related coronavirus 2 (SARS-CoV-2) lineage with multiple spike mutations in South Africa," *medRxiv*, vol. 2, 2020, doi: 10.1101/2020.12.21.20248640.

⁶⁵ BOOЗ, "BOOЗ вирішила назвати варіанти коронавірусу грецькими літерами," 01.06.2021. <https://p.dw.com/p/3uFUW>, 2021.

⁶⁶ V. E. Hillary and S. A. Ceasar, "An update on COVID-19: SARS-CoV-2 variants, antiviral drugs, and vaccines," *Heliyon*, vol. 9, no. 3, p. e13952, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13952.

⁶⁷ V. E. Hillary and S. A. Ceasar, "An update on COVID-19: SARS-CoV-2 variants, antiviral drugs, and vaccines," *Heliyon*, vol. 9, no. 3, p. e13952, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13952.

⁶⁸ K. Ramanathan et al., "A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person to person transmission: a study of a family cluster," *Lancet*, vol. 395, no. 10223, pp. 514–523, 2020, [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30154-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30154-9).

⁶⁹ M. Hoffmann et al., "SARS-CoV-2 Cell Entry Depends on ACE2 and TMPRSS2 and Is Blocked by a Clinically Proven Protease Inhibitor," *Cell*, vol. 181, no. 2, pp. 271–280.e8, 2020, doi: 10.1016/j.cell.2020.02.052.

⁷⁰ J. Biryukov et al., "SARS-CoV-2 is rapidly inactivated at high temperature," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 19, no. 2, pp. 1773–1777, 2021, doi: 10.1007/s10311-021-01187-x.

1.3. Патогенетичні механізми розвитку захворювання

Воротами входження інфекції при COVID-19 є дихальні шляхи, кон'юктива, рідше шлунково-кишковий тракт. Для інфікування клітин вірус використовує рецептор ACE2⁷¹ та TMPRSS2 — мембрано-зв'язуючу серинову протеазу⁷². Остання, разом із фурином, активує протеїн S SARS-CoV-2 шляхом розриву кількох пептидних зв'язків між S1 та S2 доменами. S білок — це тримерний злитий білок класу I, що складається з двох функціональних субодиниць, відповідальних за зв'язування з рецептором (субодиниця S1) і злиття мембрани (субодиниця S2). Наступає приєднання вірусу до плазматичної мембрани клітини-мішені, в подальшому протеїн N та вірусна РНК потрапляють у цитоплазму клітини-мішені, де вірус реплікується⁷³.

Wrapp D et al після детального вивчення 3-D моделі SARS-CoV-2, встановив що протеїн S є головним чинником у процесі інфікування вірусом клітин людини. Він відповідає за взаємодію з рецептором на поверхні клітини-хазяїна та за входження вірусу в клітину-мішень. Білок S є гомотримером, тобто утворюється трьома однаковими субодиницями, а кожна субодиниця має два домени — S1 і S2. Зовнішній ектодомен, який утворюється зовнішньою частиною субодиниці з N-кінця, включає в себе RBD в кожному S1-домени. Ці RBD здійснюють взаємодію з мембранним протеїном клітини — ангіотензин-перетворюючим ферментом 2 (АПФ2)⁷⁴. Кожен S тример має три рецептор-зв'язувальні домени SARS-CoV-2, що відрізняє його від SARS-CoV і підтримує більш щільну взаємодію з протеїном АПФ2. Цей процес відображає першу фазу патогенезу, яка в більшості випадків призводить до зупинки розвитку інфекції та характеризується легким перебігом захворювання^{75,76}.

Cantuti-Castelvetri et al повідомляє про те, що окрім відомого рецептора АПФ2⁷⁷, є інший клітинний рецептор — нейтропін-1 (NRP1)⁷⁸. Цей рецептор значно підвищує інфекційність SARS-CoV-2 та може пояснити його тропізм до різних органів та систем, роблячи нетиповий перебіг COVID-19. NRP1 взаємодіє з ендотеліальним фактором росту та відіграє важливу роль у процесах ангіогенезу та васкуляризації. Його значна присутність у респіраторному і ольфакторному епітелії та ендотеліальних клітинах підтверджується патоморфологічним аналізом, де виявлено велику кількість вірусу в NRP1 ендотеліальних клітинах капілярів та середнього розміру кровоносних судинах нюхових цибулин. Експериментально підтверджено роль NRP1 рецептора в потрапленні вірусу SARS-CoV-2 в ЦНС⁷⁹.

⁷¹ H. Xu et al., "High expression of ACE2 receptor of 2019-nCoV on the epithelial cells of oral mucosa," *Int. J. Oral Sci.*, vol. 12, no. 1, p. 8, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41368-020-0074-x.

⁷² M. Hoffmann et al., "SARS-CoV-2 Cell Entry Depends on ACE2 and TMPRSS2 and Is Blocked by a Clinically Proven Protease Inhibitor," *Cell*, vol. 181, no. 2, pp. 271-280.e8, 2020, doi: 10.1016/j.cell.2020.02.052.

⁷³ M. Hoffmann et al., "SARS-CoV-2 Cell Entry Depends on ACE2 and TMPRSS2 and Is Blocked by a Clinically Proven Protease Inhibitor," *Cell*, vol. 181, no. 2, pp. 271-280.e8, 2020, doi: 10.1016/j.cell.2020.02.052.

⁷⁴ D. Wrapp et al., "Cryo-EM structure of the 2019-nCoV spike in the prefusion conformation," *Science* (80-.), vol. 367, no. 6483, pp. 1260–1263, 2020, doi: 10.1126/science.aax0902.

⁷⁵ K. G. Andersen, A. Rambaut, W. I. Lipkin, E. C. Holmes, and R. F. Garry, "The proximal origin of SARS-CoV-2," *Nat. Med.*, vol. 26, no. 4, pp. 450–452, 2020, doi: 10.1038/s41591-020-0820-9.

⁷⁶ X. Zhang, X. Zhang, S. Li, and S. Niu, "ACE2 and COVID-19 and the resulting ARDS," *Postgrad. Med. J.*, pp. 403–407, 2020, doi: 10.1136/postgradmedj-2020-137935.

⁷⁷ B. Coutard, C. Valle, X. de Lamballerie, B. Canard, N. G. Seidah, and E. Decroly, "The spike glycoprotein of the new coronavirus 2019-nCoV contains a furin-like cleavage site absent in CoV of the same clade," *Antiviral Res.*, vol. 176, no. January, p. 104742, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.antiviral.2020.104742.

⁷⁸ L. Cantuti-Castelvetri et al., "Neuropilin-1 facilitates SARS-CoV-2 cell entry and infectivity," *Science* (80-.), vol. 370, no. 6518, pp. 856–860, 2020, doi: 10.1126/science.abd2985.

⁷⁹ L. Cantuti-Castelvetri et al., "Neuropilin-1 facilitates SARS-CoV-2 cell entry and infectivity," *Science* (80-.), vol. 370, no. 6518, pp. 856–860, 2020, doi: 10.1126/science.abd2985.

Однією з основних ланок патогенезу є рецептор ангіотензин-перетворюючого ферменту II, який SARS-CoV-2 використовує для потрапляння в клітини-мішені. ACE2 рецептори вірусу сконцентровані в невеликій популяції альвеолярних клітинах типу II (AT2), основною функцією яких є синтез сурфактанту. Швидка реплікація вірусу в легенях може спричинити апоптоз клітин (5), одночасне зниження експресії ACE2 може змінити ренін-ангіотензинову систему з підвищенням ангіотензину-2, що збільшує запалення та проникність судин, викликаючи набряк легень. В легенях SARS-CoV-2 уражає переважно пневмоцити та макрофаги, активуючи їх. Синдром активації макрофагів залежить від стану імунної відповіді пацієнта і полягає в цитолітичній активності лімфоцитів. Клінічні ознаки гемофагоцитарного синдрому (ГФС) характерні для гіперзапального синдрому, який виникає в результаті ініціювання тригерів неконтрольованого запалення або синдрому бурі цитокінів (IL-2, IL-6, IL-7, IL-10, GCSF, IP 10, MCP-1, MIP-1, і TNF- α)⁸⁰; недостатність легеневого сурфактанту є найбільш важливими ланками у розвитку ГРДС, пневмонії, легеневої недостатності, що в подальшому може призвести до фіброзу легень^{81,82}.

Уражається система мононуклеарних фагоцитів, розвивається лімфопенія та пригнічується синтез інтерферону. Водночас зменшується частка Т-клітин (Т-клітин-хелперів і Т-клітин пам'яті), а рівень наївних Т-клітин-хелперів підвищується, що спостерігається при тяжкому захворюванні⁸³⁸⁴⁸⁵⁸⁶⁸⁷⁸⁸.

Як правило, вірусне навантаження SARS-CoV-2 підвищується протягом першого тижня клінічної картини, а потім поступово знижується⁸⁹. Однак у деяких пацієнтів спостерігається погіршення стану, яке супроводжується зниженням вірусного навантаження та погіршенням параметрів запалення⁹⁰. Дослідження підтверджують, що на 7–10 день виникнення клінічних ознак спостерігається підвищення рівня IgG та IgM до SARS-CoV-2, а також прогресуюче зниження вірусного навантаження⁹¹. Збереження високого вірусного навантаження та гіперзапальної

⁸⁰ C. Crayne and R. Q. Cron, "Pediatric macrophage activation syndrome, recognizing the tip of the iceberg," *Eur. J. Rheumatol.*, vol. 7, no. 1, pp. 13–20, Feb. 2020, doi: 10.5152/eurjrheum.2019.19150.

⁸¹ C. J. Castillo L., "Secondary hemophagocytic lymphohistiocytosis and severe sepsis/systemic inflammatory response syndrome/multiorgan dysfunction syndrome/macrophage activation syndrome share common intermediate phenotypes on a spectrum of inflammation," *Pediatr Crit Care Med.*, vol. 3, no. 3, pp. 387–392., 2009, doi: 10.1097/PCC.0b013e3181a1ae08.

⁸² P. Conti et al., "Induction of pro-inflammatory cytokines (IL-1 and IL-6) and lung inflammation by Coronavirus-19 (COVI-19 or SARS-CoV-2): anti-inflammatory strategies," *J. Biol. Regul. Homeost. Agents*, vol. 34, no. 2, pp. 327–331, 2020, doi: 10.23812/CONTI-E.

⁸³ P. Zimmermann and N. Curtis, "Why is COVID-19 less severe in children? A review of the proposed mechanisms underlying the age-related difference in severity of SARS-CoV-2 infections," *Arch. Dis. Child.*, vol. 106, no. 5, pp. 429–439, 2021, doi: 10.1136/archdischild-2020-320338.

⁸⁴ C. Qin et al., "Dysregulation of Immune Response in Patients with COVID-19 in Wuhan, China," *SSRN Electron. J.*, 2020, doi: 10.2139/ssrn.3541136.

⁸⁵ O. Boyarchuk and A. Volokha, "Editorial: Macrophage activation syndrome in children in the era of COVID-19," *Front. Pediatr.*, vol. 11, no. June, pp. 1–2, 2023, doi: 10.3389/fped.2023.1222522.

⁸⁶ S. Zubchenko, I. Kril, O. Nadizhko, O. Matsyura, and V. Chopyak, "Herpesvirus infections and post-COVID-19 manifestations: a pilot observational study," *Rheumatol. Int.*, vol. 42, no. 9, pp. 1523–1530, Sep. 2022, doi: 10.1007/s00296-022-05146-9.

⁸⁷ O. Boyarchuk, O. Dyvonyak, T. Hariyan, and A. Volokha, "Case report: Virus-induced hemophagocytic lymphohistiocytosis in a patient with APECED," *Front. Pediatr.*, vol. 11, no. February, pp. 1–7, 2023, doi: 10.3389/fped.2023.1086867.

⁸⁸ G. S. As and A. N. Early, "COMPLICATION OF A NEW CORONAVIRUS," vol. 2, pp. 181–185, 2022.

⁸⁹ M. Cevik, M. Tate, O. Lloyd, A. E. Maraolo, J. Schafers, and A. Ho, "SARS-CoV-2, SARS-CoV, and MERS-CoV viral load dynamics, duration of viral shedding, and infectiousness: a systematic review and meta-analysis," *The Lancet Microbe*, vol. 2, no. 1, pp. e13–e22, Jan. 2021, doi: 10.1016/S2666-5247(20)30172-5.

⁹⁰ P. Zimmermann and N. Curtis, "Why is COVID-19 less severe in children? A review of the proposed mechanisms underlying the age-related difference in severity of SARS-CoV-2 infections," *Arch. Dis. Child.*, vol. 106, no. 5, pp. 429–439, 2021, doi: 10.1136/archdischild-2020-320338.

⁹¹ K. K.-W. To et al., "Temporal profiles of viral load in posterior oropharyngeal saliva samples and serum antibody responses during infection by SARS-CoV-2: an observational cohort study," *Lancet Infect. Dis.*, vol. 20, no. 5, pp. 565–574, May 2020, doi: 10.1016/S1473-3099(20)30196-1.

відповіді при тяжкому ураженні легень та поліорганної дисфункції пояснюють поєднанням вірус-опосередкованих цитопатичних ефектів та імунологічно опосередкованого ушкодження⁹².

Механізми менш тяжкого ураження дихальних шляхів у дітей, порівняно з дорослими, можуть бути пояснені функцією вродженого імунітету з переважанням природних клітин-кілерів та наявністю більшої кількості В- і Т-лімфоцитів, що враховується у дітей, запобігаючи надмірній запальній відповіді та забезпечуючи менш тяжкий перебіг захворювання^{93,94,95}, особливо при пневмонії^{96,97}. Додатково, слід враховувати, що конкурентний ефект здорової мікробіоти дихальних шляхів може обмежувати колонізацію та ріст вірусу, впливаючи на виникнення або тяжкість інфекційного процесу⁹⁸. Дисфункція ендотелію та хронічне запалення, що супроводжуються гіперкоагуляцією, підвищенням рівня фібриногену, зниженням процесів фібринолізу й антикоагуляції, більш виражені у дорослих⁹⁹. На судинному рівні ендотеліальна функція та коагуляція краще збережені у дітей, що зменшує можливість судинних змін або легеневих тромботичних явищ¹⁰⁰.

Частий розвиток тромбоемболічних ускладнень призводить до викиду брадикініну, який спричинює вихід рідини у навколосудинний простір, викликаючи набряк¹⁰¹. Брадикінін також збільшує проникність гематоенцефалічного бар'єру, що може призводити до енцефалопатій та психотичних розладів¹⁰².

Тромботичний розлад згортання частіше зустрічається у важких випадках. Д-димер є одним з важливих маркерів згортання крові і має більшу діагностичну цінність для встановлення її ступеня тяжкості, а тромбоцитопенія більш виражена при септичному шоці. Кровотеча не є частим ускладненням COVID-19 у порівнянні зі значною частотою тромботичних явищ, тому широко рекомендується стандартна антикоагулянтна терапія¹⁰³.

Рецептори АПФ2 експресуються не лише в дихальному епітелії, а також у верхніх відділах стравоходу, ентероцитах клубової кишки, клітинах міокарда, проксимальних трубчастих клітинах нирки та уротеліальних клітинах сечового міхура¹⁰⁴. Ушкодження ентероцитів кишки призводить

⁹² N. Dhochak, T. Singhal, S. K. Kabra, and R. Lodha, "Pathophysiology of COVID-19: Why Children Fare Better than Adults?," *Indian J. Pediatr.*, vol. 87, no. 7, pp. 537–546, Jul. 2020, doi: 10.1007/s12098-020-03322-y.

⁹³ G. F. Parisi, C. Indolfi, F. Decimo, S. Leonardi, and M. Miraglia del Giudice, "COVID-19 Pneumonia in Children: From Etiology to Management," *Front. Pediatr.*, vol. 8, Dec. 2020, doi: 10.3389/fped.2020.616622.

⁹⁴ C. M. Lau et al., "Epigenetic control of innate and adaptive immune memory," *Nat. Immunol.*, vol. 19, no. 9, pp. 963–972, Sep. 2018, doi: 10.1038/s41590-018-0176-1.

⁹⁵ R. Valiathan, M. Ashman, and D. Asthana, "Effects of Ageing on the Immune System: Infants to Elderly," *Scand. J. Immunol.*, vol. 83, no. 4, pp. 255–266, Apr. 2016, doi: 10.1111/sji.12413.

⁹⁶ B. Rahimi, A. Vesal, and M. Edalatfard, "Coronavirus and Its effect on the respiratory system: Is there any association between pneumonia and immune cells," *J. Fam. Med. Prim. Care*, vol. 9, no. 9, p. 4729, 2020, doi: 10.4103/jfmprc.jfmprc_763_20.

⁹⁷ D. Kim, J. Quinn, B. Pinsky, N. H. Shah, and I. Brown, "Rates of Co-infection Between SARS-CoV-2 and Other Respiratory Pathogens," *JAMA*, vol. 323, no. 20, p. 2085, May 2020, doi: 10.1001/jama.2020.6266.

⁹⁸ S. Nickbakhsh et al., "Virus–virus interactions impact the population dynamics of influenza and the common cold," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 116, no. 52, pp. 27142–27150, Dec. 2019, doi: 10.1073/pnas.1911083116.

⁹⁹ R. J. Rosen, "Thrombotic complications in critically ill patients with COVID 19," *Thromb. Res.*, vol. 191, no. January, p. 56, 2020, doi: 10.1016/j.thromres.2020.04.032.

¹⁰⁰ D. Wang et al., "Clinical Characteristics of 138 Hospitalized Patients With 2019 Novel Coronavirus–Infected Pneumonia in Wuhan, China," *JAMA*, vol. 323, no. 11, p. 1061, Mar. 2020, doi: 10.1001/jama.2020.1585.

¹⁰¹ L. E. Hetland, K. S. Susrud, K. H. Lindahl, and A. Bygum, "Henoch-schönlein purpura: A literature review," *Acta Derm. Venereol.*, vol. 97, no. 10, pp. 1160–1166, 2017, doi: 10.2340/00015555-2733.

¹⁰² M. R. Garvin et al., "A mechanistic model and therapeutic interventions for covid-19 involving a ras-mediated bradykinin storm," *Elife*, vol. 9, pp. 1–16, 2020, doi: 10.7554/eLife.59177.

¹⁰³ T. Iba, J. H. Levy, M. Levi, and J. Thachil, "Coagulopathy in COVID-19," *J. Thromb. Haemost.*, vol. 18, no. 9, pp. 2103–2109, 2020, doi: 10.1111/jth.14975.

¹⁰⁴ H. Xu et al., "High expression of ACE2 receptor of 2019-nCoV on the epithelial cells of oral mucosa," *Int. J. Oral Sci.*, vol. 12, no. 1, p. 8, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41368-020-0074-x.

до надмірної секреції рідини та розвитку діарейного синдрому¹⁰⁵. Розподіл експресії рецептора АПФ2 в цих клітинних популяціях відповідає ураженим органам-мішеням та клінічній картині інфекції COVID-19¹⁰⁶.

У дітей з SARS-CoV-2 можуть спостерігатися розлад коагуляції, підвищення рівня Д-димеру та зростання рівня венозної тромбоемболії¹⁰⁷. Цей процес частково зумовлений системним розладом, пов'язаним із відкладанням IgA та компонентів системи комплементу у дрібних кровоносних судинах. Рецептори вірусу SARS-CoV-2, такі як ACE2, NRP1 та ендотеліальний фактор росту, які відіграють важливу роль у васкуляризації, також сприяють цьому процесу¹⁰⁸.

Розуміння гуморальної імунної відповіді на інфекцію SARS-CoV-2 відіграватиме вирішальну роль у розробці вакцин і терапевтичних стратегій. Дослідження антитіл у реконвалесцентів розкрило системні реакції антитіл та секреторного IgA. У той час, як оцінка нейтралізації та ефекторних функцій, опосередкованих антитілами, виявила поліфункціональні реакції антитіл у сироватці, носоглоткові секреторні імуноглобуліни відіграють роль у знешкодженні вірусу. Нейтралізація сироватки та ефекторні функції корелювали з величиною системної відповіді IgG, специфічної для SARS-CoV-2, тоді як нейтралізація слизової оболонки була пов'язана з назальним SARS-CoV-2-специфічним IgA. Асоціації між реакцією назального IgA, нейтралізацією вірусу на слизовій оболонці та менш важким захворюванням свідчать про важливість оцінки імунітету слизової оболонки у більших природних когортах інфекцій. Подальша характеристика відповідей антитіл може визначити їх здатність сприяти захисту від інфекції або зниженню ризику госпіталізації, інформуючи про стратегії оцінки охорони здоров'я та зусилля з розробки вакцини¹⁰⁹. У ранній гуморальній відповіді на SARS-CoV-2, антитіла IgA відіграють ключову роль, сприяючи нейтралізації вірусу. Відсутність анти-SARS-CoV-2 IgA та секреторного IgA (sIgA) може бути причиною тяжкого перебігу COVID-19, неефективної вакцинації та тривалого виділення вірусу у пацієнтів із первинним дефіцитом антитіл, включаючи селективний дефіцит IgA¹¹⁰.

1.4. Клінічні особливості перебігу COVID-19 у дітей та критерії тяжкості

Відомо, що вірус уражає всі вікові групи^{111,112}. Важкість перебігу COVID-19 та летальність безпосередньо корелюють із зростанням віку хворих та кількістю супутніх захворювань¹¹³. Прояви COVID-19 у дітей за клінічними характеристиками схожий на ГРПІ¹¹⁴.

¹⁰⁵ T. Zuo et al., "free information in English and Mandarin on the novel coronavirus COVID- BASIC AND TRANSLATIONAL — ALIMENTARY TRACT Alterations in Gut Microbiota of Patients With COVID-19 During Time of Hospitalization," *Gastroenterology*, vol. 159, no. January, pp. 944–955, 2020.

¹⁰⁶ B. С. Копча, "Особливості Імунозалежних Проявів При Covid-19," *Інфекційні Хвороби*, vol. 2, no. 2, pp. 4–16, 2021, doi: 10.11603/1681-2727.2021.2.12159.

¹⁰⁷ W. B. Mitchell et al., "Children and young adults hospitalized for severe COVID-19 exhibit thrombotic coagulopathy," *Pediatr. Blood Cancer*, no. September 2020, pp. 1–7, 2021, doi: 10.1002/pbc.28975.

¹⁰⁸ C. Niño-Taravilla, Y. P. Espinosa-Vielma, H. Otaola-Arca, C. Poli-Harlowe, L. I. Tapia, and P. Ortiz-Fritz, "Pediatric inflammatory multisystem syndrome temporally associated with SARS-CoV-2 treated with tocilizumab," *Pediatr. Rep.*, vol. 12, no. 3, pp. 142–148, 2020, doi: 10.3390/PEDIATRIC12030029.

¹⁰⁹ S. E. Butler et al., "Distinct Features and Functions of Systemic and Mucosal Humoral Immunity Among SARS-CoV-2 Convalescent Individuals," *Front. Immunol.*, vol. 11, no. January, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3389/fimmu.2020.618685.

¹¹⁰ I. Quinti, E. P. Mortari, A. Fernandez Salinas, C. Milito, and R. Carsetti, "IgA Antibodies and IgA Deficiency in SARS-CoV-2 Infection," *Front. Infect. Microbiol.*, vol. 11, no. April, pp. 1–5, 2021, doi: 10.3389/fcimb.2021.655896.

¹¹¹ S. Bialek et al., "Severe Outcomes Among Patients with Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) — United States, February 12–March 16, 2020," *MMWR. Morb. Mortal. Wkly. Rep.*, vol. 69, no. 12, pp. 343–346, 2020, doi: 10.15585/mmwr.mm6912e2.

¹¹² R. M. Viner et al., "Susceptibility to SARS-CoV-2 Infection among Children and Adolescents Compared with Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis," *JAMA Pediatr.*, vol. 175, no. 2, pp. 143–156, 2021, doi: 10.1001/jamapediatrics.2020.4573.

¹¹³ Z. M. Chen et al., "Diagnosis and treatment recommendations for pediatric respiratory infection caused by the 2019 novel coronavirus," *World J. Pediatr.*, vol. 16, no. 3, pp. 240–246, 2020, doi: 10.1007/s12519-020-00345-5.

¹¹⁴ C. Huang et al., "Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China," *Lancet*, vol. 395, no. 10223, pp. 497–506, Feb. 2020, doi: 10.1016/S0140-6736(20)30183-5.

Інкубаційний період згідно з Lauer et al., може коливатися від 3 до 14 днів¹¹⁵, з середньою тривалістю – 5,7 днів¹¹⁶.

Клінічний спектр дитячого COVID-19 дуже широкий: від безсимптомного¹¹⁷ до критично важкого захворювання¹¹⁸. Серед обстежених дітей з SARS-CoV-2, відзначаються безсимптомний, легкий, середньо-тяжкий, тяжкий та критично-тяжкий перебіг COVID-19, що становить 29,5 %, 56,4 %, 12,9 %, 1,2 % і 0 %, відповідно¹¹⁹. За результатами досліджень, більшість випадків виявляються легкими або середньо-тяжкими формами, а критичні випадки вкрай рідко спостерігаються¹²⁰.

Найпоширенішими ознаками та симптомами у дітей та підлітків є лихоманка, кашель, біль голови, біль у горлі, міалгія, задишка, нудота, біль у животі, блювота та діарея^{121,122,123}. Інші клінічні ознаки пов'язані з ураженням очей, шкіри, нирок, нервової системи у вигляді аносмії, агевзії, менінгітів, зустрічаються рідше у дітей з COVID-19 або у деяких випадках гірше діагностуються через особливості дитячого віку^{124,125,126,127}.

Причинами госпіталізації у дітей були інтоксикаційний, диспепсичний та респіраторний синдроми. У 65 % дітей спостерігали загальні симптоми, які є характерними для гострої респіраторної вірусної інфекції; у понад 50% пацієнтів була фебрильна гарячка, у 38 % – кашель, у 21 % – діарея¹²⁸. Це свідчить про необхідність уважного моніторингу та ефективного контролю за проявами захворювання у дітей, які інфіковані вірусом SARS-CoV-2.

Зазначено, що діти відіграють важливу роль в епідеміологічному процесі, особливо враховуючи невиразність клінічної картини, що може ускладнити вчасну діагностику COVID-19 та збільшити захворюваність в суспільстві¹²⁹.

У 2020 році Carlotti APCP та його колеги вперше представили критерії тяжкості перебігу COVID-19 у дітей. Критерії тяжкості базувались на наявності конкретних симптомів.

¹¹⁵ C. Cervia et al., "Systemic and mucosal antibody responses specific to SARS-CoV-2 during mild versus severe COVID-19," *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 147, no. 2, pp. 545–557.e9, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jaci.2020.10.040.

¹¹⁶ S. A. Lauer et al., "The incubation period of coronavirus disease 2019 (CoVID-19) from publicly reported confirmed cases: Estimation and application," *Ann. Intern. Med.*, vol. 172, no. 9, pp. 577–582, 2020, doi: 10.7326/M20-0504.

¹¹⁷ R. Mungmunpuntantip and V. Wiwanitkit, "Chest computed tomography in children with COVID-19," *Pediatr. Radiol.*, vol. 50, no. 7, p. 1018, 2020, doi: 10.1007/s00247-020-04676-3.

¹¹⁸ D. Bixler et al., "SARS-CoV-2–Associated Deaths Among Persons Aged <21 Years — United States, February 12–July 31, 2020," *MMWR. Morb. Mortal. Wkly. Rep.*, vol. 69, no. 37, pp. 1324–1329, 2020, doi: 10.15585/mmwr.mm6937e4.

¹¹⁹ E. Berksoy et al., "Clinical and laboratory characteristics of children with SARS-CoV-2 infection," *Pediatr. Pulmonol.*, vol. 56, no. 12, pp. 3674–3681, 2021, doi: 10.1002/ppul.25654.

¹²⁰ C. Huang et al., "Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China," *Lancet*, vol. 395, no. 10223, pp. 497–506, Feb. 2020, doi: 10.1016/S0140-6736(20)30183-5.

¹²¹ H. Qiu, J. Wu, L. Hong, Y. Luo, Q. Song, and D. Chen, "Clinical and epidemiological features of 36 children with coronavirus disease 2019 (COVID-19) in Zhejiang, China: an observational cohort study," *Lancet Infect. Dis.*, vol. 20, no. 6, pp. 689–696, 2020, doi: 10.1016/S1473-3099(20)30198-5.

¹²² J. She, L. Liu, and W. Liu, "COVID-19 epidemic: Disease characteristics in children," *J. Med. Virol.*, vol. 92, no. 7, pp. 747–754, 2020, doi: 10.1002/jmv.25807.

¹²³ L. S. Shekerdemian et al., "Characteristics and outcomes of children with coronavirus disease 2019 (COVID-19) infection admitted to US and Canadian pediatric intensive care units," *JAMA Pediatr.*, vol. 174, no. 9, pp. 868–873, 2020, doi: 10.1001/jamapediatrics.2020.1948.

¹²⁴ H. Qiu, J. Wu, L. Hong, Y. Luo, Q. Song, and D. Chen, "Clinical and epidemiological features of 36 children with coronavirus disease 2019 (COVID-19) in Zhejiang, China: an observational cohort study," *Lancet Infect. Dis.*, vol. 20, no. 6, pp. 689–696, 2020, doi: 10.1016/S1473-3099(20)30198-5.

¹²⁵ J. She, L. Liu, and W. Liu, "COVID-19 epidemic: Disease characteristics in children," *J. Med. Virol.*, vol. 92, no. 7, pp. 747–754, 2020, doi: 10.1002/jmv.25807.

¹²⁶ L. S. Shekerdemian et al., "Characteristics and outcomes of children with coronavirus disease 2019 (COVID-19) infection admitted to US and Canadian pediatric intensive care units," *JAMA Pediatr.*, vol. 174, no. 9, pp. 868–873, 2020, doi: 10.1001/jamapediatrics.2020.1948.

¹²⁷ W. Song, J. Li, N. Zou, W. Guan, J. Pan, and W. Xu, "Clinical features of pediatric patients with coronavirus disease (COVID-19)," *J. Clin. Virol.*, vol. 127, no. April, p. 104377, 2020, doi: 10.1016/j.jcv.2020.104377.

¹²⁸ M. Jahangir, M. Nawaz, D. Nanjiani, and M. S. Siddiqui, "Clinical manifestations and outcomes of COVID-19 in the paediatric population: a systematic review," *Hong Kong Med. J.*, pp. 35–45, 2020, doi: 10.12809/hkmj208646.

¹²⁹ M. Jahangir, M. Nawaz, D. Nanjiani, and M. S. Siddiqui, "Clinical manifestations and outcomes of COVID-19 in the paediatric population: a systematic review," *Hong Kong Med. J.*, pp. 35–45, 2020, doi: 10.12809/hkmj208646.

Асимптоматична форма характеризувалася відсутністю клінічних проявів та ознак ураження легень на рентгенограмі при позитивному ПЛР на SARS-CoV-2. При легкій формі спостерігаються лихоманка / її відсутність, втома, міалгія, кашель, біль у горлі, нежить і чхання, ураження з боку легень відсутні; іноді нудота, блювання, біль у животі та діарею. Середньо-тяжка форма включає такі симптоми як гарячка, кашель та ознаки пневмонії але без дистресу, діарея без ознак зневоднення або за відсутності клінічних ознак хвороби з пневмонією. Тяжка форма характеризувалася респіраторним синдромом ($SpO_2 < 94\%$) та розладами ШКТ, а критично-тяжка форма супроводжувалася стрімким погіршення стану з ураженням дихальної системи з розвитком ГРДС, шоком, енцефалопатією, ураженням міокарда, серцевою недостатністю, коагулопатією, гострим ураженням нирок та поліорганною дисфункцією¹³⁰.

За даними статистики у США станом на 24 лютого 2022 року діти віком до 18 років склали 17,6 % від загальної кількості випадків COVID-19¹³¹. Важливо відзначити, що в різні епідемічні періоди від 3,5 % до 7 % дітей потребували госпіталізації¹³², у відділення інтенсивної терапії – 0,8 % і смертність серед них становила близько 0,1 %¹³³.

Відзначається, що найбільш поширеним та значущим ускладненням, що призводить до госпіталізації у дітей з SARS-CoV-2, є пневмонія, яка розвивається протягом 5-7 днів від початку захворювання. Грізним ускладненням SARS-CoV-2 є розвиток ГРДС, причиною якого є ГФС характерний для гіперзапальних синдромів або синдрому бурі цитокінів¹³⁴.

Превалюючими клінічними ознаками пневмонії, спричиненої SARS-CoV-2 у дітей, є тахіпное та лихоманка, водночас кашель не є одним із провідних симптомів пневмонії при COVID-19. Аускультативна картина не відображає інтенсивності ураження легень. Проте при проведенні комп'ютерної томографії (КТ) легень виявляють безліч тіней та ознаки матового скла¹³⁵.

Серед проявів COVID-19 у дітей виявлено аритмії, міокардит і перикардит. Аритмії можуть включати шлуночкову та передсердну тахікардії, а також атріовентрикулярну блокаду першого ступеня. Зазвичай аритмії самостійно зникають, не потребуючи лікування, але у деяких випадках можуть застосовуватися профілактичні антиаритмічні засоби. Вкрай рідко у дітей зустрічалась рецидивуюча шлуночкова тахікардія з гіпертрофічною кардіоміопатією. Зокрема, медична спільнота Індії документувала випадки ураження серцево-судинної системи при COVID-19 у дітей із вадами серця. Ця категорія дітей із серцево-судинними захворюваннями визначається групою підвищеного ризику смерті при інфікуванні SARS-CoV-2¹³⁶. Важливо відзначити, що серцево-судинні ускладнення у дітей є рідкісними і частіше спостерігаються при МЗС-синдромі¹³⁷. Для попередження можливого розвитку цього патологічного процесу ключовими є своєчасне виявлення

¹³⁰ A. P. de C. Panzeri Carlotti, W. B. de Carvalho, C. Johnston, I. S. Rodriguez, and A. F. Delgado, "Covid-19 diagnostic and management protocol for pediatric patients," *Clinics*, vol. 75, pp. 1–5, 2020, doi: 10.6061/CLINICS/2020/E1894.

¹³¹ P.-N. Jone et al., "SARS-CoV-2 Infection and Associated Cardiovascular Manifestations and Complications in Children and Young Adults: A Scientific Statement From the American Heart Association," *Circulation*, vol. 145, no. 19, May 2022, doi: 10.1161/CIR.0000000000001064.

¹³² COVID-NET, "A Weekly Summary of U.S. COVID-19 Hospitalization Data," Accessed October 4, 2020(https://gis.cdc.gov/grasp/covidnet/covid19_3.html).

¹³³ P.-N. Jone et al., "SARS-CoV-2 Infection and Associated Cardiovascular Manifestations and Complications in Children and Young Adults: A Scientific Statement From the American Heart Association," *Circulation*, vol. 145, no. 19, May 2022, doi: 10.1161/CIR.0000000000001064.

¹³⁴ C. B. Crayne, S. Albeituni, K. E. Nichols, and R. Q. Cron, "The immunology of macrophage activation syndrome," *Front. Immunol.*, vol. 10, no. FEB, pp. 1–11, 2019, doi: 10.3389/fimmu.2019.00119.

¹³⁵ W. Xia, J. Shao, Y. Guo, X. Peng, Z. Li, and D. Hu, "Clinical and CT features in pediatric patients with COVID-19 infection: Different points from adults," *Pediatr. Pulmonol.*, vol. 55, no. 5, pp. 1169–1174, 2020, doi: 10.1002/ppul.24718.

¹³⁶ S. Sachdeva et al., "Outcome of COVID 19 positive children with heart disease and grown ups with congenital heart disease : A multicentric study from India," 2021, doi: 10.4103/apc.apc.

¹³⁷ P.-N. Jone et al., "SARS-CoV-2 Infection and Associated Cardiovascular Manifestations and Complications in Children and Young Adults: A Scientific Statement From the American Heart Association," *Circulation*, vol. 145, no. 19, May 2022, doi: 10.1161/CIR.0000000000001064.

дітей із вадами серця та їх вакцинація¹³⁸. Дані щодо тромбозу у дітей з SARS-CoV-2 є мізерними. Згідно з глобальним когортним дослідженням, відсоток випадків тромботичних ускладнень у госпіталізованих дітей, інфікованих SARS-CoV-2, коливається від 0,7 % до 1,1 %. Важливо відзначити, що значення Д-димеру в цій педіатричній групі не виявилось достатньо специфічним для прогнозування ризику тромбозу¹³⁹.

Найчастіше місце тромбозу – легені (21 %). У дітей, заражених SARS-CoV-2, ризик ішемічного інсульту (0,82 %) та тромбозу глибоких вен у випадку МЗС (4,3 %) був нижчим порівняно з дорослими. Незважаючи на те, що тромботичні або тромбоемболічні явища рідкісні у дітей, необхідна настороженість щодо групи ризику дітей з COVID-19 та МЗС із супутніми захворюваннями та схильністю до тромбозів^{140,141}. Підлітковий вік та наявні фактори ризику тромбозу можуть вказувати на необхідність антикоагулянтної профілактики для дітей із COVID-19¹⁴².

1.5. Мультисистемний запальний синдром, асоційований з SARS-CoV-2 у дітей, критерії діагностики

У країнах з високим рівнем захворюваності на коронавірусну хворобу COVID-19, з'явилася інформація про незвичний синдром лихоманки та запальний синдром у дітей. У всіх пацієнтів діагностовано гарячку та неспецифічні симптоми, включаючи блювання, біль у животі та діарею, висипання, ін'єкції кон'юнктиви¹⁴³. Все більше зростала кількість повідомлень про такі тяжкі й грізні ускладнення, такі як хвороба Кавасакі, Кавасакі-подібний синдром та МЗС, також відомий як Multisystem inflammatory syndrome in children (MIS-C)¹⁴⁴. У червні 2020 року в Каліфорнії вперше описаний випадок хвороби Кавасакі, пов'язаної з COVID-19¹⁴⁵. За даними науковців з США, пік МЗС спостерігали при зниженні активності COVID-19. Середній інтервал між початком симптомів COVID-19 та початком МЗС становив 25 днів (від 6 до 51 дня)¹⁴⁶.

Усе частіше науковці описували синдром, схожий на ХК, проте за результатами проведених досліджень виявлено деяку відмінність: по-перше, середній вік пацієнтів вищий (> 5 років) ніж при класичній ХК; по-друге, частота та тяжкість ураження міокарда значно відрізняються від характеристик класичної ХК; по-третє, біль у животі та/або пронос спостерігаються частіше (81 %). При цьому цитокіновий шторм, який супроводжує цей синдром, характеризується збільшеними рівнями СРП, феритину та цитокінів, зокрема IL-1, TNFα та IL-6, і клінічно проявляється серцевою недостатністю, пневмонією, порушеннями функції шлунково-кишкового тракту, неврологічними та

¹³⁸ P.-N. Jone et al., "SARS-CoV-2 Infection and Associated Cardiovascular Manifestations and Complications in Children and Young Adults: A Scientific Statement From the American Heart Association," *Circulation*, vol. 145, no. 19, May 2022, doi: 10.1161/CIR.0000000000001064.

¹³⁹ D. Aguilera-Alonso et al., "Prevalence of thrombotic complications in children with SARS-CoV-2," *Arch. Dis. Child.*, vol. 106, no. 11, pp. 1129–1132, 2021, doi: 10.1136/archdischild-2020-321351.

¹⁴⁰ M. Zaffanello, G. Piacentini, L. Nosetti, S. Ganzarolli, and M. Franchini, "Thrombotic risk in children with COVID-19 infection: A systematic review of the literature," *Thromb. Res.*, vol. 205, no. January, pp. 92–98, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.thromres.2021.07.011.

¹⁴¹ S. Vallejo et al., "Omicron and Thrombosis in Children," *Pediatr. Infect. Dis. J.*, vol. Publish Ah, no. 5, pp. 252–254, 2022, doi: 10.1097/inf.0000000000003501.

¹⁴² D. Aguilera-Alonso et al., "Prevalence of thrombotic complications in children with SARS-CoV-2," *Arch. Dis. Child.*, vol. 106, no. 11, pp. 1129–1132, 2021, doi: 10.1136/archdischild-2020-321351.

¹⁴³ L. Verdoni et al., "An outbreak of severe Kawasaki-like disease at the Italian epicentre of the SARS-CoV-2 epidemic: an observational cohort study," *Lancet*, 2020, doi: 10.1016/S0140-6736(20)31103-X.

¹⁴⁴ K. Chiotos et al., "Multisystem Inflammatory Syndrome in Children During the Coronavirus 2019 Pandemic: A Case Series," *J. Pediatric Infect. Dis. Soc.*, vol. 9, no. 3, pp. 393–398, 2020, doi: 10.1093/jpids/piaa069.

¹⁴⁵ V. G. Jones et al., "COVID-19 and Kawasaki Disease: Novel Virus and Novel Case," *Hosp. Pediatr.*, vol. 10, no. 6, 2020, doi: 10.1542/hpeds.2020-0123.

¹⁴⁶ L. R. Feldstein et al., "Multisystem Inflammatory Syndrome in U.S. Children and Adolescents," *N. Engl. J. Med.*, vol. 383, no. 4, pp. 334–346, 2020, doi: 10.1056/nejmoa2021680.

нирковими розладами¹⁴⁷. Вік дітей та підвищений рівень феритину є прогностично несприятливими факторами для перебігу захворювання та необхідності лікування у відділенні інтенсивної терапії¹⁴⁸.

Роль вродженої імунної системи виявляється ключовою у появі САМ. Генетична схильність та можливі провокуючі фактори на фоні активного запалення призводять до збільшення активності макрофагів та Т-лімфоцитів, що спричиняє цитокинову бурю з ушкодженням тканин, дисфункцію багатьох органів та смерть¹⁴⁹.

У пацієнтів із МЗС серцево-судинні ураження виявлялись переважно у здорових дітей шкільного віку та підлітків, які проявляли ознаки, схожі на ХК. У цієї категорії пацієнтів часто фіксували кардіогенний шок (53 %), зміни на електрокардіограмі (27 %), дисфункцію міокарда (52 %) та розширення коронарних артерій (15 %)¹⁵⁰.

Реалізація передбачення тяжкого інфекційного процесу у дітей можлива при вивченні рівнів прозапальних і протизапальних цитокінів, прокальцитоніну та СРП, тропоніну¹⁵¹. У наукових дослідженнях зазначено, що показники феритину, Д-димеру, фібриногену та коагулограми є маркерами тяжкого перебігу МЗС, тоді як клінічними предикторами тяжкості є гарячка, блювання, біль у животі та діарея, а також висипання на тілі¹⁵². У 80% пацієнтів з МЗС були шлунково-кишкові розлади¹⁵³. Ще одним з факторів розвитку МЗС є гіпогамаглобулінемія, нейтрофільний лейкоцитоз, зростання показників сечовини, креатиніну, підвищення печінкових ферментів^{154,155}, а також гіпонатріємія¹⁵⁶.

Згідно з Британським протоколом МЗС, асоційований з SARS-CoV-2 – це захворювання, яке діагностують у осіб віком до 21 року, з лихоманкою більше 38 °С тривалістю ≥ 24 години, ознаками токсичного шоку, виявленням маркерів запалення (підвищення рівнів: СРП, ЛДГ, Д-димеру, ІЛ-6, ШОЕ, прокальцитоніну, нейтрофільних гранулоцитів, мозкового натрійуретичного пептиду (BNP) або натрійуретичного пептиду (ProBNP), тропоніну, феритину; зниження: рівня лімфоцитів, тромбоцитів, вмісту альбуміну та гіпонатріємія); нещодавно перенесений COVID-19 (останні 4-6 тижнів); ураження більше двох органів; виключення інших причин розвитку МЗС та важкого респіраторного захворювання¹⁵⁷.

Поява симптомів, таких як гарячка, диспепсичний синдром, набряковий синдром та синдром екзантеми у дітей із МЗС є поступовими. Абдомінальний синдром проявлявся блюванням, діареєю

¹⁴⁷ D. Bertoncelli et al., "Covid19: Potential cardiovascular issues in pediatric patients," *Acta Biomed.*, vol. 91, no. 2, pp. 177–183, 2020, doi: 10.23750/abm.v91i2.9655.

¹⁴⁸ M. Pouletty et al., "Paediatric multisystem inflammatory syndrome temporally associated with SARS-CoV-2 mimicking Kawasaki disease (Kawa-COVID-19): A multicentre cohort," *Ann. Rheum. Dis.*, vol. 79, no. 8, pp. 999–1006, 2020, doi: 10.1136/annrheumdis-2020-217960.

¹⁴⁹ O. Boyarchuk and A. Volokha, "Editorial: Macrophage activation syndrome in children in the era of COVID-19," *Front. Pediatr.*, vol. 11, no. June, pp. 1–2, 2023, doi: 10.3389/fped.2023.1222522.

¹⁵⁰ M. Rodriguez-Gonzalez, A. Castellano-Martinez, H. M. Cascales-Poyatos, and A. A. Perez-Reviriego, Cardiovascular impact of COVID-19 with a focus on children: A systematic review, vol. 8, no. 21. 2020.

¹⁵¹ E. Whittaker et al., "Clinical Characteristics of 58 Children with a Pediatric Inflammatory Multisystem Syndrome Temporally Associated with SARS-CoV-2," *JAMA - J. Am. Med. Assoc.*, vol. 324, no. 3, pp. 259–269, 2020, doi: 10.1001/jama.2020.10369.

¹⁵² E. Whittaker et al., "Clinical Characteristics of 58 Children with a Pediatric Inflammatory Multisystem Syndrome Temporally Associated with SARS-CoV-2," *JAMA - J. Am. Med. Assoc.*, vol. 324, no. 3, pp. 259–269, 2020, doi: 10.1001/jama.2020.10369.

¹⁵³ M. F. B. Pereira et al., "Severe clinical spectrum with high mortality in pediatric patients with covid-19 and multisystem inflammatory syndrome," *Clinics*, vol. 75, pp. 1–7, 2020, doi: 10.6061/clinics/2020/e2209.

¹⁵⁴ Z. Belladje et al., "Acute Heart Failure in Multisystem Inflammatory Syndrome in Children in the Context of Global SARS-CoV-2 Pandemic," *Circulation*, vol. 142, no. 5, pp. 429–436, 2020, doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.120.048360.

¹⁵⁵ D. Matsubara et al., "Echocardiographic Findings in Pediatric Multisystem Inflammatory Syndrome Associated With COVID-19 in the United States," *J. Am. Coll. Cardiol.*, vol. 76, no. 17, pp. 1947–1961, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jacc.2020.08.056.

¹⁵⁶ V. G. Jones et al., "COVID-19 and Kawasaki Disease: Novel Virus and Novel Case," *Hosp. Pediatr.*, vol. 10, no. 6, 2020, doi: 10.1542/hpeds.2020-0123.

¹⁵⁷ A. S. Algarni, N. M. Alamri, N. Z. Khayat, R. A. Alabdali, R. S. Alsubhi, and S. H. Alghamdi, "Clinical practice guidelines in multisystem inflammatory syndrome (MIS-C) related to COVID-19: a critical review and recommendations," *World J. Pediatr.*, vol. 18, no. 2, pp. 83–90, Feb. 2022, doi: 10.1007/s12519-021-00499-w.

та інтенсивним болем у животі, що було підставою до госпіталізації, а в окремих випадках – до оперативного втручання¹⁵⁸.

1.6. Діагностика COVID-19: сучасні методи та їхні переваги

Виявлення РНК або її фрагментів SARS-CoV-2 методом ПЛР є одним з важливих критеріїв діагностики, не зважаючи на можливість хибно негативних результатів у 15% - 30%¹⁵⁹. У дослідженнях проведених в Китаї вказано про наявність РНК SARS-CoV-2 в калі за її відсутності в назофарингеальному матеріалі^{160,161,162}.

Надалі вивчався геном SARS-CoV-2¹⁶³. Дослідження встановило початкові точки генетичного аналізу та ідентифікації SARS-CoV-2. Геномне секвенування виявилось ключовим для розуміння мутацій та поширення вірусу¹⁶⁴.

Водночас імунохроматографічний аналіз IgG/IgM Rapid Test (PRIMA Lab SA) може доповнювати молекулярні-біологічні тести при скринінгу SARS-CoV-2¹⁶⁵.

Для покращення діагностики COVID-19 дослідниками розроблено комбінований аналіз IgM-IgG до SARS-CoV-2 методом ІФА. Поєднання виявлення нуклеїнової кислоти SARS-CoV-2 методом ПЛР та тестування IgM, IgG є більш чутливим та точним підходом для діагностики хибнонегативних результатів на нуклеїнову кислоту¹⁶⁶.

Збільшення як IgM, так і IgG спостерігається через 6-7 днів від появи симптомів хвороби¹⁶⁷. Важливо відзначити, що, на відміну від дорослих, діти з COVID-19 переважно генерують IgG-антитіла, специфічні до спайкового білка SARS-CoV-2^{168,169}.

Проведено оцінку кінетики антитіл IgM, IgA та IgG до SARS-CoV-2 у пацієнтів з підтвердженою (rRT-PCR) COVID-19 інфекцією. Виявлено, що поява IgA є швидкою, тривалою і наростання його значення досягає максимуму на 3-му тижні. Відповідь IgA є більш стійкою ніж відповідь IgM¹⁷⁰.

У хворих з тяжким перебігом COVID-19 виявлено, що титри IgA та IgG, специфічні для сироваткового S-білка SARS-CoV-2, стають позитивними в середньому протягом 3–5 днів після

¹⁵⁸ L. Tullie et al., "Gastrointestinal features in children with COVID-19: an observation of varied presentation in eight children," *Lancet Child Adolesc. Heal.*, vol. 4, no. 7, pp. e19–e20, 2020, doi: 10.1016/S2352-4642(20)30165-6.

¹⁵⁹ World Health Organization Europe (WHO Europe), "Coronavirus disease (COVID-19) technical guidance: Laboratory testing for 2019-nCoV in humans.," <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/technical-guidance/laboratory-guidance>, 2020.

¹⁶⁰ Y. Xu et al., "Characteristics of pediatric SARS-CoV-2 infection and potential evidence for persistent fecal viral shedding," *Nat. Med.*, vol. 26, no. 4, pp. 502–505, 2020, doi: 10.1038/s41591-020-0817-4.

¹⁶¹ N. Krajcar et al., "Epidemiological and clinical features of Croatian children and adolescents with a PCR-confirmed coronavirus disease 2019: Differences between the first and second epidemic wave," *Croat. Med. J.*, vol. 61, no. 6, pp. 491–500, 2020, doi: 10.3325/CMJ.2020.61.491.

¹⁶² A. C. Ramírez-Cázares, Y. G. Hernández-Ruiz, C. A. Martínez-Longoria, C. E. Tamez-Gómez, O. Medina-Macías, and R. G. Treviño-Montalvo, "Clinical characteristics of pediatric patients with confirmed SARS-CoV-2 infection who followed rigorous measures during two years of the COVID-19 pandemic in a hospital in Mexico," *Front. Pediatr.*, vol. 11, no. June, pp. 1–10, 2023, doi: 10.3389/fped.2023.1150738.

¹⁶³ S. Marquez et al., "Genome sequencing of the first SARS-CoV-2 reported from patients with COVID-19 in Ecuador.," *medRxiv Prepr. Serv. Heal. Sci.*, 2020, doi: 10.1101/2020.06.11.20128330.

¹⁶⁴ P. Yadav et al., "Full-genome sequences of the first two SARS-CoV-2 viruses from India," *Indian J. Med. Res.*, vol. 151, no. 2, p. 200, 2020, doi: 10.4103/ijmr.IJMR_663_20.

¹⁶⁵ D. Canetti et al., "SARS-CoV-2 IgG/IgM rapid test as a diagnostic tool in hospitalized patients and healthcare workers, at a large teaching hospital in northern Italy, during the 2020 COVID-19 pandemic," *New Microbiol.*, vol. 43, no. 4, pp. 161–165, 2020.

¹⁶⁶ J. Xie et al., "Characteristics of patients with coronavirus disease (COVID-19) confirmed using an IgM-IgG antibody test," *J. Med. Virol.*, vol. 92, no. 10, pp. 2004–2010, 2020, doi: 10.1002/jmv.25930.

¹⁶⁷ A. Padoan et al., "Analytical performances of a chemiluminescence immunoassay for SARS-CoV-2 IgM/IgG and antibody kinetics," *Clin. Chem. Lab. Med.*, vol. 58, no. 7, pp. 1081–1088, 2020, doi: 10.1515/cclm-2020-0443.

¹⁶⁸ S. P. Weisberg et al., "Distinct antibody responses to SARS-CoV-2 in children and adults across the COVID-19 clinical spectrum," *Nat. Immunol.*, vol. 22, no. 1, pp. 25–31, Jan. 2021, doi: 10.1038/s41590-020-00826-9.

¹⁶⁹ J. S. M. Peiris, "Coronaviruses," in *Medical Microbiology*, Elsevier, 2012, pp. 587–593.

¹⁷⁰ A. Padoan et al., "IgA-Ab response to spike glycoprotein of SARS-CoV-2 in patients with COVID-19: A longitudinal study," *Clin. Chim. Acta*, vol. 507, no. January, pp. 164–166, 2020, doi: 10.1016/j.cca.2020.04.026.

виникнення симптомів. Ці класи антитіл продемонстрували сильну кореляцію з тривалістю хвороби, незалежно від віку, статі та інших супутніх захворювань^{171,172}.

Загальні клінічні та біохімічні аналізи крові свідчать про зниження середньої кількості лейкоцитів та нейтрофілів, нижчий рівень Д-димеру та нормальний рівень прокальцитоніну у дітей із середньо-тяжким перебігом COVID-19¹⁷³ на противагу тяжкому¹⁷⁴.

Рівні та класи антитіл при МЗС та коронавірусній інфекції різняться залежно від тяжкості хвороби¹⁷⁵. Також встановлено, що у дітей із МЗС спостерігається вищий рівень антитіл порівняно з випадками без МЗС¹⁷⁶.

1.7. Інструментальні методи діагностики

На початку пандемії у дітей пневмонію, викликану SARS-CoV-2, діагностували за допомогою КТ грудної клітки. Це дослідження вперше використовувалося як скринінговий метод при COVID-19¹⁷⁷. Згодом науковці рекомендували віддавати перевагу рентгенографії грудної клітки у діагностиці пневмонії, а КТ слід проводити, якщо на рентгенографії є патологічні знахідки, які заслуговують на подальшу оцінку або якщо є клінічні покази^{178,179}. Проте в подальшому використання УЗД легень виявило не менш діагностично-цінні критерії інтерстиційного набряку, пневмонії та консолидацій¹⁸⁰. Все більше наукових досліджень підтверджують УЗД легень, як надійний та безпечний метод діагностики консолидацій, ателектазів та/або бронхоектазів як для дорослих, так і для новонароджених^{181,182,183,184}.

УЗД визнане як безпечний та інформативний метод для діагностики уражень легень при COVID-19. Цей метод є особливо доступним на догоспітальному етапі, навіть до появи клінічних проявів, і дозволяє проводити діагностику у пацієнтів із тяжкими формами захворювання, яких важко транспортувати, вагітних жінок та осіб, які перебувають у районах з високим рівнем

¹⁷¹ C. Cervia et al., "Systemic and mucosal antibody responses specific to SARS-CoV-2 during mild versus severe COVID-19," *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 147, no. 2, pp. 545-557.e9, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jaci.2020.10.040.

¹⁷² S. P. Weisberg et al., "Distinct antibody responses to SARS-CoV-2 in children and adults across the COVID-19 clinical spectrum," *Nat. Immunol.*, vol. 22, no. 1, pp. 25-31, Jan. 2021, doi: 10.1038/s41590-020-00826-9.

¹⁷³ E. Berksoy et al., "Clinical and laboratory characteristics of children with SARS-CoV-2 infection," *Pediatr. Pulmonol.*, vol. 56, no. 12, pp. 3674-3681, 2021, doi: 10.1002/ppul.25654.

¹⁷⁴ E. D. Hottz et al., "Platelet activation and platelet-monocyte aggregate formation trigger tissue factor expression in patients with severe COVID-19," *Blood*, vol. 136, no. 11, pp. 1330-1341, Sep. 2020, doi: 10.1182/blood.2020007252.

¹⁷⁵ S. P. Weisberg et al., "Distinct antibody responses to SARS-CoV-2 in children and adults across the COVID-19 clinical spectrum," *Nat. Immunol.*, vol. 22, no. 1, pp. 25-31, Jan. 2021, doi: 10.1038/s41590-020-00826-9.

¹⁷⁶ I. Maniu, G. C. Maniu, E. Antonescu, L. Duica, N. Grigore, and M. Totan, "SARS-CoV-2 Antibody Responses in Pediatric Patients: A Bibliometric Analysis," *Biomedicines*, vol. 11, no. 5, 2023, doi: 10.3390/biomedicines11051455.

¹⁷⁷ M. Soy, G. Keser, P. Atagündüz, F. Tabak, I. Atagündüz, and S. Kayhan, "Cytokine storm in COVID-19: pathogenesis and overview of anti-inflammatory agents used in treatment," *Clin. Rheumatol.*, vol. 39, no. 7, pp. 2085-2094, 2020, doi: 10.1007/s10067-020-05190-5.

¹⁷⁸ F. Palabiyik, S. O. Kokurcan, N. Hatipoglu, S. O. Cebeci, and E. Inci, "Imaging of COVID-19 pneumonia in children," *Br. J. Radiol.*, vol. 93, no. 1113, p. 20200647, Sep. 2020, doi: 10.1259/bjr.20200647.

¹⁷⁹ P. Caro-Dominguez et al., "Thoracic imaging of coronavirus disease 2019 (COVID-19) in children: a series of 91 cases," *Pediatr. Radiol.*, vol. 50, no. 10, pp. 1354-1368, Sep. 2020, doi: 10.1007/s00247-020-04747-5.

¹⁸⁰ S. Pecho-Silva et al., "Pulmonary Ultrasound in the Diagnosis and Monitoring of Coronavirus Disease (COVID-19): A Systematic Review," *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 47, no. 8, pp. 1997-2005, 2021, doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2021.04.011.

¹⁸¹ I. M. Ciucu et al., "Lung Ultrasound in Children with Cystic Fibrosis in Comparison with Chest Computed Tomography: A Feasibility Study," *Diagnostics*, vol. 12, no. 2, p. 376, Feb. 2022, doi: 10.3390/diagnostics12020376.

¹⁸² C. Caroselli, M. Blaivas, and S. Falzetti, "Diagnostic Imaging in Newborns, Children and Adolescents Infected with Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2): Is There a Realistic Alternative to Lung High-Resolution Computed Tomography (HRCT) and Chest X-Rays? A Systematic Review," *Ultrasound Med. Biol.*, vol. 47, no. 11, pp. 3034-3040, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2021.07.015.

¹⁸³ T. M. Kennedy et al., "Lung point-of-care ultrasound in pediatric COVID-19: A case series," *Pediatr. Emerg. Care*, vol. 36, no. 11, pp. 544-548, 2020, doi: 10.1097/PEC.0000000000002254.

¹⁸⁴ E. Y. Lee and A. J. Winant, "Lung ultrasound for evaluation of pediatric COVID-19 infection: What we already know, what we need to investigate now, and what we can expect in the future," *Pediatr. Pulmonol.*, vol. 56, no. 6, pp. 1295-1296, Jun. 2021, doi: 10.1002/ppul.25281.

інфекційного ризику¹⁸⁵. Деякі діти, навіть після місяців гострої інфекції, демонстрували зміни при УЗД легень та вказували на покращення з плином часу після гострого COVID-19¹⁸⁶. В дослідженні легень у немовлят та дітей до двох років з інфекцією SARS-CoV-2 використовувалася УЗД. У всіх обстежених дітей (100 %) виявлені розсіяні В-лінії, проте альвеолярний синдром (конфлюентні В-лінії) був присутній лише у 36,84 % випадків. Зміни в легенях корелювали із біомаркерами запалення, зокрема з ЛДГ, Д-димером, IL-6 та насиченням тканин киснем¹⁸⁷.

Отже, за даними систематичного огляду, основні зміни, які можна виявити за допомогою УЗД легень під час обстеження дітей із SARS-CoV-2, включають: поперечні фізіологічні А-лінії, що відповідають здоровій паренхімі; ізольовані/розсіяні вертикальні В-лінії, еквівалентні інтерстиціальному набряку; вертикальні В-лінії, що зливаються, відповідають альвеолярному набряку; субплевральні/периферичні ущільнення; нерівності та потовщення плеври¹⁸⁸.

1.8. Лікування COVID-19 та асоційованих з ним ускладнень у дітей

Поява нової коронавірусної інфекції стала викликом для лікарів різних спеціальностей. Це вимагало глобальних наукових та економічних зусиль для розробки нових препаратів, підходів до діагностики та затвердження відповідних протоколів лікування. Протягом усієї пандемії підходи до лікування COVID-19 неодноразово змінювалися.

Тактика лікування залежить від тяжкості перебігу хвороби. Оптимальна стратегія лікування має бути спрямована на зниження вірусного навантаження^{189,190}. Засобом, який дав бажаний терапевтичний ефект у лікуванні SARS-CoV-2, став ремдесивір (GS-5734), відомий з 2014 року. Ремдесивір – синтетичний противірусний препарат, який належить до групи нуклеозидних аналогів. Є інгібітором РНК-полімерази з потужною противірусною активністю¹⁹¹.

Незважаючи на те, що SARS-CoV-2 менше уражає дітей, тяжкі пневмонії, ГРДС, ураження нервової системи, нирок розвиваються і у пацієнтів дитячого віку. Відтак постало нагальне питання щодо можливості застосування цього препарату у дітей¹⁹². У листопаді 2020 року було опубліковано дослідження щодо застосування ремдесивіру у дітей, яке виявило позитивний результат¹⁹³.

Рекомендована доза ремдесивіру для дітей з масою тіла від 3,5 до 40 кг становила: першого дня навантажувальна доза ремдесивіру - 5 мг/кг внутрішньовенно, з наступним введенням 2,5 мг/кг внутрішньовенно раз на добу протягом 4 днів^{194,195}.

¹⁸⁵ G. Soldati and M. Demi, "What Is COVID 19 Teaching Us about Pulmonary Ultrasound?," *Diagnostics*, vol. 12, no. 4, p. 838, 2022, doi: 10.3390/diagnostics12040838.

¹⁸⁶ D. P. La Regina et al., "Pediatric COVID-19 Follow-Up with Lung Ultrasound: A Prospective Cohort Study," *Diagnostics*, vol. 12, no. 9, 2022, doi: 10.3390/diagnostics12092202.

¹⁸⁷ E. R. Stoicescu et al., "COVID-19 in Infants and Children under 2 Years—Could Lung Ultrasound Score Be Correlated with Biomarkers and Symptoms?," *Biomedicines*, vol. 11, no. 10, pp. 1–18, 2023, doi: 10.3390/biomedicines11102620.

¹⁸⁸ J. Gil-Rodríguez et al., "Ultrasound findings of lung ultrasonography in COVID-19: A systematic review," *Eur. J. Radiol.*, vol. 148, p. 110156, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ejrad.2022.110156.

¹⁸⁹ В. Чоп'як, Х. Ліщук-Якимович, and П. Пукаляк, "Імунологічні Аспекти Covid-2019: Реалії Та Перспективи," *Immunol. Allergol. Sci. Pract.*, no. 3–4, pp. 34–41, 2020, doi: 10.37321/immunology.2020.3-4-04.

¹⁹⁰ World Health Organization Europe (WHO Europe), "COVID-19 : безпека праці та здоров'я медичних працівників," no. 3, 2021.

¹⁹¹ J. J. Malin, I. Suárez, V. Priesner, G. Fätkenheuer, and J. Rybníček, "Remdesivir against COVID-19 and Other Viral Diseases," *Clin. Microbiol. Rev.*, vol. 34, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1128/CMR.00162-20.

¹⁹² K. Chiotos et al., "Compassionate Use of Remdesivir in Children With Severe COVID-19 Time to Discharge by Baseline Oxygen Support," no. July, p. 11763, 2020.

¹⁹³ A. Méndez-Echevarría et al., "Compassionate use of remdesivir in children with COVID-19," *Eur. J. Pediatr.*, vol. 180, no. 4, pp. 1317–1322, Apr. 2021, doi: 10.1007/s00431-020-03876-1.

¹⁹⁴ D. K. Wati and A. K. Manggala, "Overview of management of children with COVID-19," *Korean J. Pediatr.*, vol. 63, no. 9, pp. 345–354, 2020, doi: 10.3345/cep.2020.00913.

¹⁹⁵ G. F. Parisi, C. Indolfi, F. Decimo, S. Leonardi, and M. Miraglia del Giudice, "COVID-19 Pneumonia in Children: From Etiology to Management," *Front. Pediatr.*, vol. 8, Dec. 2020, doi: 10.3389/fped.2020.616622.

Використання антибіотиків не завжди було обґрунтованим через невизначені діагностичні критерії для позалікарняної пневмонії та пневмонії, спричиненої SARS-CoV-2¹⁹⁶. Важливо враховувати пошкодження легень, спричинене імунною дисфункцією, обумовленою проникненням вірусу в тканини та гіперцитокінемією, яка є чинником ризику суперінфекції¹⁹⁷. Згідно з дослідженнями, вторинна бактеріальна пневмонія при COVID-19 спостерігалась у значній кількості випадків, досягаючи 30 %^{198,199}.

У зв'язку з різними протоколами вакцинації в різних країнах, підходи до призначення антибіотиків різняться. Дітям з повною імунізацією проти *H. influenzae* типу *b* та *St. pneumoniae* рекомендується ампіцилін; альтернативою може бути цефтріаксон або цефотаксим. У дітей без повної імунізації проти цих бактерій рекомендується застосовувати цефтріаксон або цефотаксим як стартову емпіричну терапію. Таким чином, дані про вакцинальний статус можуть визначати вибір антибіотикотерапії²⁰⁰.

З урахуванням дифузного ураження легень і розвитку ГРДС важливим є застосування стероїдних гормонів. Глюкокортикоїди можуть ефективно зменшувати опосередковані запаленням ушкодження легень, сповільнюючи прогресування дихальної недостатності та знижуючи ризик летальних випадків. Призначення стероїдних гормонів є обов'язковим при тяжких пневмоніях, ГРДС та токсичному шоці²⁰¹. Виживаність пацієнтів, які перебували на ШВЛ і отримували дексаметазон, була вдвічі вищою, ніж у тих, хто не отримував дексаметазон^{202,203,204}.

Оскільки головним органом-мішенню при COVID-19 є легені, то саме ГРДС є основною причиною погіршення стану пацієнтів та їх госпіталізації у відділення інтенсивної терапії. Швидкий розвиток тяжкої дихальної недостатності і гіпоксемії зумовлює застосування різних методик респіраторної терапії, а у випадку їх неефективності вимагає екстракорпоральної мембранної оксигенації (ЕКМО) як варіант останньої можливої рятувальної технології. ЕКМО слід розглядати як варіант терапії у пацієнтів, в яких традиційні методи респіраторної підтримки, включаючи механічну вентиляцію легень на животі, не забезпечують адекватної оксигенації крові.

Згідно з даними EuroELSO частота використання ЕКМО під час пандемії COVID-19 становила 0,5 % - 1 % від всіх госпіталізованих у відділення інтенсивної терапії пацієнтів²⁰⁵. Станом на 20 квітня 2022 року кількість дітей, які отримували ЕКМО, зросла до 47 дітей, 17 з яких хворіли на

¹⁹⁶ B. J. Langford et al., "Antibiotic prescribing in patients with COVID-19: rapid review and meta-analysis," Clin. Microbiol. Infect., vol. 27, no. 4, pp. 520–531, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.cmi.2020.12.018.

¹⁹⁷ I. J. Onakpoya, G. Hayward, and C. J. Heneghan, "Antibiotics for preventing lower respiratory tract infections in high-risk children aged 12 years and under," Cochrane Database Syst. Rev., Sep. 2015, doi: 10.1002/14651858.CD011530.pub2.

¹⁹⁸ M. Chedid, R. Waked, E. Haddad, N. Chetata, G. Saliba, and J. Choucair, "Antibiotics in treatment of COVID-19 complications: a review of frequency, indications, and efficacy," J. Infect. Public Health, vol. 14, no. 5, pp. 570–576, May 2021, doi: 10.1016/j.jiph.2021.02.001.

¹⁹⁹ K. Ramanathan et al., "Azithromycin in patients admitted to hospital with COVID-19 (RECOVERY): a randomised, controlled, open-label, platform trial," no. January, pp. 19–21, 2020, doi: 10.1016/S0140-6736(21)00149-5.

²⁰⁰ A. B. Brueggemann et al., "Changes in the incidence of invasive disease due to *Streptococcus pneumoniae*, *Haemophilus influenzae*, and *Neisseria meningitidis* during the COVID-19 pandemic in 26 countries and territories in the Invasive Respiratory Infection Surveillance Initiative: a," Lancet Digit. Heal., vol. 3, no. 6, pp. e360–e370, 2021, doi: 10.1016/S2589-7500(21)00077-7.

²⁰¹ W. Y. Kim, O. J. Kweon, M. J. Cha, M. S. Baek, and S. H. Choi, "Dexamethasone may improve severe COVID-19 via ameliorating endothelial injury and inflammation: A preliminary pilot study," PLoS One, vol. 16, no. 7 July, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0254167.

²⁰² The RECOVERY Collaborative Group, "Dexamethasone in Hospitalized Patients with Covid-19 — Preliminary Report," N. Engl. J. Med., pp. 693–704, 2020, doi: 10.1056/nejmoa2021436.

²⁰³ R. A. C. Siemieniuk et al., "Drug treatments for covid-19: Living systematic review and network meta-Analysis," BMJ, vol. 370, pp. 1–16, 2020, doi: 10.1136/bmj.m2980.

²⁰⁴ M. Youseffard et al., "Corticosteroids on the management of coronavirus disease 2019 (Covid-19): A systemic review and meta-analysis," Iran. J. Public Health, vol. 49, no. 8, pp. 1411–1421, 2020, doi: 10.18502/ijph.v49i8.3863.

²⁰⁵ E. ELISO, "European Survey on ECMO in COVID-19 pts at 7/05/20," Available in: <https://www.euroelso.net/covid-19/covid-19-survey/>. Accessed at 10 de mayo de 2020.

ГРДС²⁰⁶. За даними Zabrocki LA, Brogan TV, Statler KD та інших щодо виживання дітей, результати лікування ЕКМО в педіатричній популяції є кращими, ніж у дорослих, і становлять в середньому 57%^{207,208,209}.

Призначення антикоагулянтів при COVID-19 у дітей проводиться з урахуванням факторів ризику розвитку тромбозу, серед яких: тромбофілія, венозна тромбоемболія в анамнезі, пубертатний вік, онкогематологічні захворювання, серцева недостатність, ожиріння, значне зневоднення, оперативні втручання, автоімунні захворювання, тривала іммобілізація пацієнта, наявність внутрішньовенних катетерів та МЗС^{210,211,212,213,214}.

На думку вчених, нестабільні стани, які пов'язані з розвитком шоку, гіпотонії, значної гіпоксемії, виявлення у лабораторних показниках не тільки підвищення, а й зниження фібриногену у зв'язку з розвитком легеневої внутрішньосудинної коагулопатії потребують як НФГ, так і НМГ^{215,216}. Водночас науковці наголошують на необхідності ретельного врахування ризику кровотечі у кожної дитини, зокрема при використанні як профілактичної, так і терапевтичної антикоагулянтної терапії²¹⁷.

Призначення імуномодуючої терапії для лікування дітей з тяжкими формами SARS-CoV-2 та МЗС відіграє життєво важливе значення²¹⁸. Подальші наукові дослідження доказали ефективність імуноглобуліну (IVIG) у новонароджених (1 г/кг/добу протягом 2 днів або 400 мг/кг/добу протягом 5 днів)²¹⁹.

Використання IVIG у дітей з МЗС, асоційованим із SARS-CoV-2, має виражений терапевтичний ефект як при дворазовому, так і при одноразовому введенні даного препарату²²⁰. Більшої дози та повторного введення IVIG потребували діти, яким МЗС діагностовано на другому

²⁰⁶ ECLS, "Registry Dashboard of ECMO-Supported COVID-19 Patient Data," <https://www.else.org/Registry/FullCOVID-19RegistryDashboard.aspx>.

²⁰⁷ C. Alonso Díaz, M. López Maestro, M. T. Moral Pumarega, B. Flores Antón, and C. R. Pallás Alonso, "Primer caso de infección neonatal por SARS-CoV-2 en España," *An. Pediatría*, 2020, doi: 10.1016/j.anpedi.2020.03.002.

²⁰⁸ J. S. M. Ong, A. Tosoni, Y. Kim, N. Kissoon, and S. Murthy, "Coronavirus Disease 2019 in Critically Ill Children: A Narrative Review of the Literature*," *Pediatr. Crit. Care Med.*, vol. 21, no. 7, pp. 662–666, Jul. 2020, doi: 10.1097/PCC.0000000000002376.

²⁰⁹ W. Guan et al., "Clinical Characteristics of Coronavirus Disease 2019 in China," *N. Engl. J. Med.*, vol. 382, no. 18, pp. 1708–1720, 2020, doi: 10.1056/nejmoa2002032.

²¹⁰ M. Zaffanello, G. Piacentini, L. Nasetti, S. Ganzarolli, and M. Franchini, "Thrombotic risk in children with COVID-19 infection: A systematic review of the literature," *Thromb. Res.*, vol. 205, no. January, pp. 92–98, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.thromres.2021.07.011.

²¹¹ H. Whitworth et al., "Rate of thrombosis in children and adolescents hospitalized with COVID-19 or MIS-C," *Blood*, vol. 138, no. 2, pp. 190–198, Jul. 2021, doi: 10.1182/blood.2020010218.

²¹² M. Al-Ghafry et al., "Are children with SARS-CoV-2 infection at high risk for thrombosis? Viscoelastic testing and coagulation profiles in a case series of pediatric patients," *Pediatr. Blood Cancer*, vol. 67, no. 12, 2020, doi: 10.1002/pbc.28737.

²¹³ N. A. Goldenberg et al., "Consensus-based clinical recommendations and research priorities for anticoagulant thromboprophylaxis in children hospitalized for COVID-19-related illness," *J. Thromb. Haemost.*, vol. 18, no. 11, pp. 3099–3105, 2020, doi: 10.1111/jth.15073.

²¹⁴ M. Karimi et al., "Antithrombotic prophylaxis in children and adolescent patients with sars-cov-2 (Covid-19) infection: A practical guidance for clinicians," *Acta Biomed.*, vol. 91, no. 4, pp. 1–8, 2020, doi: 10.23750/abm.v91i4.10720.

²¹⁵ A. Prats-Urbe et al., "Use of repurposed and adjuvant drugs in hospital patients with covid-19: Multinational network cohort study," *BMJ*, vol. 373, pp. 1–12, 2021, doi: 10.1136/bmj.n1038.

²¹⁶ A. T. Obi, G. D. Barnes, L. M. Napolitano, P. K. Henke, and T. W. Wakefield, "Venous thrombosis epidemiology, pathophysiology, and anticoagulant therapies and trials in severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 infection," *Journal of Vascular Surgery: Venous and Lymphatic Disorders*, vol. 9, no. 1, pp. 23–35, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jvsv.2020.08.030.

²¹⁷ M. Loi, B. Branchford, J. Kim, C. Self, and R. Nuss, "COVID-19 anticoagulation recommendations in children," *Pediatr. Blood Cancer*, vol. 67, no. 9, pp. 17–19, 2020, doi: 10.1002/pbc.28485.

²¹⁸ J. Zhang et al., "Effectiveness of intravenous immunoglobulin for children with severe COVID-19: a rapid review," *Ann. Transl. Med.*, vol. 8, no. 10, pp. 625–625, 2020, doi: 10.21037/atm-20-3305.

²¹⁹ D. U. De Rose et al., "Novel Coronavirus disease (COVID-19) in newborns and infants: what we know so far," *Ital. J. Pediatr.*, vol. 46, no. 1, p. 56, Dec. 2020, doi: 10.1186/s13052-020-0820-x.

²²⁰ Q. Y. Zhang, B. W. Xu, and J. B. Du, "Similarities and differences between multiple inflammatory syndrome in children associated with COVID-19 and Kawasaki disease: clinical presentations, diagnosis, and treatment," *World J. Pediatr.*, vol. 17, no. 4, pp. 335–340, 2021, doi: 10.1007/s12519-021-00435-y.

тижні від початку клінічних симптомів²²¹. Введення IVIG у дозі 2 г/кг має виражений терапевтичний ефект при ураженні коронарних судин та запобігає їх ураженню²²². Водночас, на думку інших науковців, поєднання IVIG зі стероїдними гормонами має кращий терапевтичний ефект у пацієнтів з гіповолемічним шоком²²³.

Для лікування, зменшення тривалості клінічних ознак та запобігання розвитку тяжких форм SARS-CoV-2 у дорослих та підлітків, пацієнтів з імуносупресією, окрім IVIG, рекомендовано використання моноклональних антитіл (МА). МА впливають на білки шиповидних відростків оболонки вірусу SARS-CoV-2²²⁴. В Україні дозволено застосування МА, які представлені бамланівімабом та етесівімабом, у підлітків старших 12 років з вагою не менше 40 кілограмів, які мають високий ризик розвитку тяжкої форми хвороби та позитивний ПЛР тест на SARS-CoV-2²²⁵.

1.9. Профілактика COVID-19 у дітей

У боротьбі з пандемією COVID-19 важливою стратегією є вакцинація, яка запобігає тяжким формам хвороби, госпіталізації та смерті, зменшує ймовірність передачі SARS-CoV-2, що стримує поширення інфекції^{226,227}.

Вакцина Pfizer-BioNTech розроблена німецькою біотехнологічною компанією BioNTech спільно з американським фармакологічним концерном Pfizer. Розробка мРНК-вакцини забезпечує ефективну та швидку вакцинальну відповідь²²⁸.

Після клінічних досліджень у багатьох країнах світу, використання м-РНК вакцини проти SARS-CoV-2 не виявила серйозних побічних ефектів. Втома, біль у м'язах, переважно тимчасові та спостерігаються частіше після другої дози вакцини²²⁹. Медики визначили можливість розвитку міокардиту. За даними CDC, міокардит у підлітків чоловічої статі віком 12 – 17 років розвинувся у 6 осіб на 100 000 і в більшості випадків спостерігалось швидке одужання^{230,231}.

²²¹ B. Platt et al., “Comparison of Risk of Recrudescence Fever in Children With Kawasaki Disease Treated With Intravenous Immunoglobulin and Low-Dose vs High-Dose Aspirin,” *JAMA Netw. Open*, vol. 3, no. 1, p. e1918565, Jan. 2020, doi: 10.1001/jamanetworkopen.2019.18565.

222 T. Ramcharan et al., “Paediatric Inflammatory Multisystem Syndrome: Temporally Associated with SARS-CoV-2 (PIMS-TS): Cardiac Features, Management and Short-Term Outcomes at a UK Tertiary Paediatric Hospital,” *Pediatr. Cardiol.*, vol. 41, no. 7, pp. 1391–1401, 2020, doi: 10.1007/s00246-020-02391-2.

223 J. Kabeerdoss, R. K. Pillania, R. Karkhele, T. S. Kumar, D. Danda, and S. Singh, "Severe COVID-19, multisystem inflammatory syndrome in children, and Kawasaki disease: immunological mechanisms, clinical manifestations and management," *Rheumatol. Int.*, vol. 41, no. 1, pp. 19–32, 2021, doi: 10.1007/s00296-020-04749-4.

²²⁴ M. P. O'Brien et al., "Subcutaneous REGEN-COV Antibody Combination to Prevent Covid-19," *N. Engl. J. Med.*, vol. 385, no. 13, pp. 1184–1195, 2021, doi: 10.1056/nejmoa2109682.

²²⁵ МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ, “Наказ МОЗ України від 20.09.2021 № 1979 ‘Про внесення змін до протоколу «Надання медичної допомоги для лікування коронавірусної хвороби (COVID-19)»,” <https://moz.gov.ua/article/ministry-mandates/nakaz-moz-ukraini-vid-20092021--1979-pro-vnesennja-zmin-do-protokolu--nadannja-medichnoi-dopomogi-dlja-likuvannja--koronavirusnoi-hvorobi-covid-19?preview=1>.

226 M. Clinic, "COVID-19 vaccines for kids: What you need to know," <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/coronavirus/in-depth/covid-19-vaccines-for-kids/art-20513332>.

²²⁷ A. Jara et al., “Effectiveness of an Inactivated SARS-CoV-2 Vaccine in Chile,” *N. Engl. J. Med.*, vol. 385, no. 10, pp. 875–884, 2021, doi: 10.1056/nejmoa2107715.

228 A. Banerji et al., “mRNA Vaccines to Prevent COVID-19 Disease and Reported Allergic Reactions: Current Evidence and Suggested Approach,” *J. Allergy Clin. Immunol. Pract.*, vol. 9, no. 4, pp. 1423–1437, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jaip.2020.12.047.

²²⁹ M. Clinch, "COVID-19 vaccines for kids: What you need to know," <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/coronavirus/in-depth/covid-19-vaccines-for-kids/art-20513332>.

²³⁰ M. Wallace, S. Oliver, and A. Meeting, “cdc.gov/coronavirus COVID-19 mRNA vaccines in adolescents and young adults: Benefit-risk discussion,” p. June 23, 2021, [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/vaccines/acip/meetings/downloads/slides-2021-06/05-COVID-Wallace-508.pdf>.

²³¹ S. Mallapaty, “Heart-inflammation risk from Pfizer COVID vaccine is very low,” *Nature*, Oct. 2021, doi: 10.1038/d41586-021-02740-y.

Вакцину Pfizer-BioNTech внесли до списку для екстреного використання ВООЗ, що дозволило використання вакцини у дітей з 12 річного віку^{232,233}.

Після тривалих досліджень, було підтверджено безпечність застосування у дітей від 5 до 11 років^{234,235,236}.

Національна технічна група експертів з питань імунопрофілактики розробила рекомендації щодо щеплення підлітків в Україні. Внаслідок цього МОЗ ухвалило відповідний наказ № 2234 від 13 жовтня 2021. Вакцинації від COVID-19 підлягають діти віком від 12 років, в яких проведена обов'язкова вакцинація згідно з Національним календарем щеплень (форма 063/о)^{237,238}. Для дітей 5–11 років доступна вакцина Comirnaty від Pfizer-BioNTech, одна доза якої містить втричі менше активних речовин. Інтервал між першою та другою дозою становить не менше 3 тижнів. Міністерство охорони здоров'я наказом № 1586 від 02.09.2022 року дозволило здійснювати другу бустерну дозу вакцини проти коронавірусу всім охочим, а також рекомендує вакцинувати дітей віком від 5 до 11 років²³⁹.

Вакцина **Coronavac** — це інактивована вакцина, розроблена китайським фармацевтичним підприємством Sinovac Biotech. Ця вакцина містить у своєму складі інактивований вірус. З 2021 року Хан В. та співавторами, встановлено безпечність використання CoronaVac у дітей та підлітків віком 3-17 років. Результати підтверджують використання дози 3,0 мкг із дворазовою схемою імунізації у дітей та підлітків²⁴⁰.

Аналізуючи інформацію з наукових джерел встановлено, що вакцинація є ефективним методом запобігання розвитку SARS-CoV-2 інфекції спричиненої різними штамами вірусу, проте ефективність її щодо штаму Омикрон є менше вираженою^{241,242,243}.

Як відомо, продукція IgA до SARS-CoV-2 (загальних/секреторних) корелює з тяжкістю захворювання. Зазначено, що інтраназальна вакцинація може стати ефективною стратегією,

²³² X. Zou and B. Cao, "COVID-19 vaccines for children younger than 12 years: are we ready?," *Lancet Infect. Dis.*, vol. 21, no. 12, pp. 1614–1615, Dec. 2021, doi: 10.1016/S1473-3099(21)00384-4.

²³³ Міністерство Охорони Здоров'я України, "В Україні рекомендували щепити від COVID-19 дітей 12+ за наявності усіх рутинних щеплень," [https://moz.gov.ua/article/news/29 жовтня 2021](https://moz.gov.ua/article/news/29%20жовтня%202021).

²³⁴ CDC, "Most Children and All Teens Can Get COVID-19 Vaccines," [https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/Updated Dec. 13, 2021](https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/Updated%20Dec.%2013,%202021).

²³⁵ E. B. Walter et al., "Evaluation of the BNT162b2 Covid-19 Vaccine in Children 5 to 11 Years of Age," *N. Engl. J. Med.*, Nov. 2021, doi: 10.1056/NEJMoa2116298.

²³⁶ <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/>, "FDA Authorizes Pfizer-BioNTech COVID-19 Vaccine for Emergency Use in Children 5 through 11 Years of Age," October 29, 2021.

²³⁷ X. Zou and B. Cao, "COVID-19 vaccines for children younger than 12 years: are we ready?," *Lancet Infect. Dis.*, vol. 21, no. 12, pp. 1614–1615, Dec. 2021, doi: 10.1016/S1473-3099(21)00384-4.

²³⁸ Міністерство Охорони Здоров'я України, "В Україні рекомендували щепити від COVID-19 дітей 12+ за наявності усіх рутинних щеплень," [https://moz.gov.ua/article/news/29 жовтня 2021](https://moz.gov.ua/article/news/29%20жовтня%202021).

²³⁹ НАКАЗ МОЗ УКРАЇНИ № 1586, "В Україні дозволили другу бустерну дозу для всіх охочих та оновили схеми вакцинації," gov.ua, 2022.

²⁴⁰ B. Han et al., "Safety, tolerability, and immunogenicity of an inactivated SARS-CoV-2 vaccine (CoronaVac) in healthy children and adolescents: a double-blind, randomised, controlled, phase 1/2 clinical trial," *Lancet Infect. Dis.*, vol. 21, no. 12, pp. 1645–1653, 2021, doi: 10.1016/S1473-3099(21)00319-4.

²⁴¹ C. Le Nouën et al., "Intranasal pediatric parainfluenza virus-vectored SARS-CoV-2 vaccine is protective in monkeys," *Cell*, vol. 185, no. 25, pp. 4811–4825.e17, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cell.2022.11.006.

²⁴² G. A. Dunay et al., "Long-Term Antibody Response to SARS-CoV-2 in Children," *J. Clin. Immunol.*, vol. 43, no. 1, pp. 46–56, 2023, doi: 10.1007/s10875-022-01355-w.

²⁴³ J. Zhou et al., "Development of variant-proof severe acute respiratory syndrome coronavirus 2, pan-sarbecovirus, and pan-β-coronavirus vaccines," *J. Med. Virol.*, vol. 95, no. 1, pp. 1–19, 2023, doi: 10.1002/jmv.28172.

спрямованою на індукцію місцевого захисного імунітету у слизовій оболонці та резидентних Т-клітин у легенях^{244,245}.

ВИСНОВКИ

SARS-CoV2 стала глобальною медичною та економічною проблемою.

Незважаючи на велику кількість публікацій, дані про клінічну характеристику коронавірусної інфекції (COVID-19) у дітей потребують чіткості у визначенні критеріїв тяжкості перебігу хвороби. Визначено лабораторні критерії діагностики, проте клінічні – потребують удосконалення.

Важливим на нашу думку є прогнозування тяжкого перебігу COVID-19, що забезпечить вчасну госпіталізацію та відповідну терапію.

У літературних джерелах є достатня кількість інформації про визначення запальних маркерів захворювання (СРП, ІЛ-6, ШОЕ та прокальцитонін), проте вивчення цитокінового спектру потребує розширення та подальшого вивчення.

Як відомо найтипівішими ускладненнями SARS-CoV2 є пневмонія та ГРДС. Важливим є передбачення розвитку ураження легень, що потребує проведення додаткових досліджень.

МЗС асоційований з SARS-CoV2 найчастіше розвивається після перенесеної хвороби. Виділено клінічні та лабораторні критерії цього синдрому. МЗС характеризується полісистемністю ураження, одним з провідних є ушкодження серцево-судинної системи. Для передбачення ураження коронарних судин, виникає потреба у проведенні подальших клініко-лабораторних дослідженнях.

Попри доступну інформацію з вивчення специфічної імунної відповіді за результатами імуноглобулінів різних класів до SARS-CoV2, недостатньо даних про тривалість постінфекційного процесу у дітей різного віку з урахуванням тяжкості перебігу хвороби. Ці дослідження важливі для проведення вакцинації, запобігання тяжких форм, летальності та обмеження поширення інфекції.

Результати досліджень, що представлені у цьому розділі, висвітлено в науковій публікації авторки²⁴⁶.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Вступ

Проведено обстеження 143 хворих, які перебували на стаціонарному лікуванні з діагнозом COVID-19 та МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 у КНП ЛОР Львівська обласна дитяча клінічна лікарня «Охматдит» та КНП ЛОР «Львівська обласна інфекційна клінічна лікарня» у педіатричному, відділенні анестезіології та інтенсивної терапії протягом 2020-2021 років. Клінічні та лабораторно-інструментальні дослідження були проведені на базах цих лікувальних закладів та у лабораторіях: «Науково-дослідний інституту епідеміології та гігієни» Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького, Державної установи «Львівський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України» та лабораторії «ЕСКУЛАБ».

Під спостереженням знаходилося 143 хворих, 110 (76,92 %) пацієнтів з COVID-19 та 33 (23,07 %) – склали особи з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2.

Критерії включення в дослідження:

- діти віком від 1 року до 18 років;

²⁴⁴ F. Palabiyik, S. O. Kokurcan, N. Hatipoglu, S. O. Cebeci, and E. Inci, "Imaging of COVID-19 pneumonia in children," *Br. J. Radiol.*, vol. 93, no. 1113, p. 20200647, Sep. 2020, doi: 10.1259/bjr.20200647.

²⁴⁵ J. Zhou et al., "Development of variant-proof severe acute respiratory syndrome coronavirus 2, pan-sarbecovirus, and pan-β-coronavirus vaccines," *J. Med. Virol.*, vol. 95, no. 1, pp. 1–19, 2023, doi: 10.1002/jmv.28172.

²⁴⁶ Г. О. Литвин and М. В. Стасів, "ПАНДЕМІЯ COVID-19 ТРИВАЛІСТЮ У ДВА РОКИ: ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ПЕДІАТРІЇ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ," *Інфекційні хвороби*, vol. 2, no. 2, pp. 58–72, Sep. 2022, doi: 10.11603/1681-2727.2022.2.13190.

- SARS-CoV-2 підтверджена методом ПЛР;
- МЗС, асоційований з SARS-CoV-2;
- індивідуальна згода дитини та її батьків на участь у дослідженні.

Критерії виключення досліджуваних із дослідження:

- відмова від підписання інформаційної згоди;
- діти з МЗС іншого генезу (рис. 2.1).

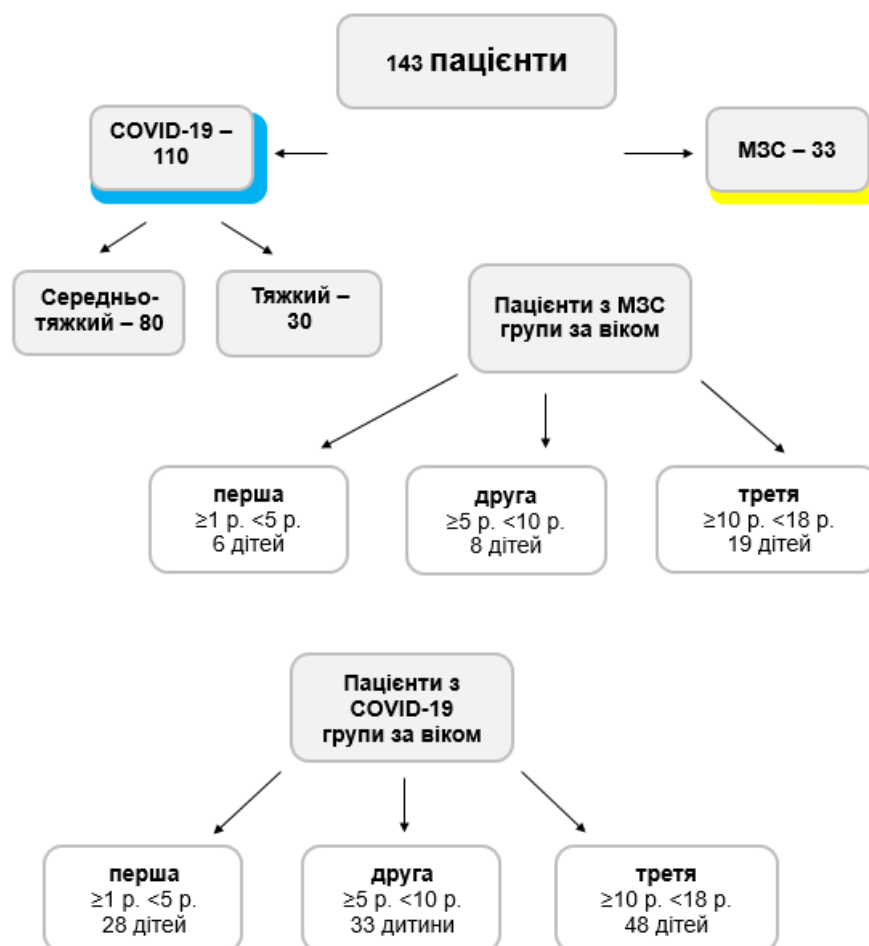


Рисунок 2.1. Групи дослідження

Комісією з питань етики наукових досліджень у Львівському національному медичному університеті імені Данила Галицького щодо проведення наукових досліджень, експериментальних розробок за участю людини (протокол № 8 від 23 листопада 2020 р.), порушень морально-етичних норм під час проведення науково-дослідної роботи не виявлено. Усі пацієнти та їх батьки дали інформовану згоду проведення дослідження.

Групи досліджуваних пацієнтів:

Діти з COVID-19 віком від 1 року до 18 років. Діагноз підтвердженою наявністю РНК SARS-CoV-2 з мазків носоглотки, методом ПЛР;

Діти з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 віком від 1 року до 18 років.

Пацієнтів з COVID-19 та МЗС було розподілено на три вікові групи: від одного до п'яти років (≥ 1 р. < 5 р.), від п'яти до десяти (≥ 5 р. < 10 р.), від десяти до вісімнадцяти років (≥ 10 р. < 18 р.).

У дослідженні взяли участь 110 (76,92 %) пацієнтів з SARS-CoV-2, серединний вік яких становив – 9,20 років [5,13; 14, 00]. Серед обстежених пацієнтів було 46 хлопців (41,8 %) та 64 дівчини (58,2 %). Серединний вік хлопців – 10,25 років (3,58; 14,78), дівчат – 9,00 років (5,58; 13,93). Середньо-тяжка форма коронавірусної інфекції розвинулася у 80 (72,72 %) пацієнтів, середній вік яких становив 8,00 років [4,98; 13,08], тяжка у – 30 (27,27 %) пацієнтів, серединний вік яких становив 12,05 років [7,65; 16,00], ($p < 0,05$).

33 дітей (23,07 %) діагностовано МЗС, асоційований з SARS-CoV-2, серединний вік яких становив 10,40 років [7,00; 14,00]. МЗС розвинувся у 18 хлопців (54,5 %) та 15 дівчат (45,5 %), серединний вік яких становив 10,25 років [7,00; 13,50] та 11,00 років [7,55; 13,70], відповідно.

Першу групу дітей з COVID-19 склали хлопці – 13 осіб (46,4 %), дівчата – 15 (53,6 %); другу – хлопці – 10 (30,3 %), дівчата – 23 (69,7 %); третю – хлопці – 23 (46,9 %), дівчата – 26 (53,1 %). Середньо-тяжку форму захворювання діагностовано у 33 хлопців (41,3 %) та у 47 дівчат (58,8 %), тоді як тяжкий перебіг хвороби спостерігався у 13 хлопців (43,3 %) та у 17 дівчат (56,7 %).

Водночас з МЗС виявлено троє хлопці (50,0 %) та троє дівчат (50,0 %) першої вікової групи; другу склали 5 хлопців (62,5 %) та 3 дівчат (37,5 %); третю – 10 хлопців (52,6 %) та 9 дівчат (47,4 %) (табл. 2.1).

Серед обстежених пацієнтів було більше число міських жителів порівняно з сільськими. COVID-19 містяни становили 68,18 %, МЗС – 57,57 %.

Таблиця 2.1

Розподіл пацієнтів з COVID-19 та МЗС за віком та статтю (з урахуванням $M \pm SD$ / Ме [25%;75%])

Нозологія	Вікова група (роки)	$M \pm SD$ / Ме [25%;75%]*	Стать	абс. число (%)
COVID-19	$\geq 1 < 5$	2,70 [1,65; 3,25]	чол	13 (46,4)
			жін	15 (53,6)
	$\geq 5 < 10$	$7,87 \pm 1,43$	чол	10 (30,3)
			жін	23 (69,7)
	$\geq 10 < 18$	$14,34 \pm 2,11$	чол	23 (46,9)
			жін	26 (53,1)
МЗС	$\geq 1 < 5$	$3,57 \pm 1,06$	чол	3 (50,0)
			жін	3 (50,0)
	$\geq 5 < 10$	$7,99 \pm 1,42$	чол	5 (62,5)
			жін	3 (37,5)
	$\geq 10 < 18$	$12,94 \pm 2,21$	чол	10 (52,6)
			жін	9 (47,4)

Примітка. * - у випадку негаусівського розподілу результати наведені у вигляді Ме [25%; 75%]

Основними клінічними симптоми у пацієнтів з COVID-19 були: підвищена температура тіла (95,5 %), загальна слабкість (91,8 %), зниження апетиту (80,0 %), кашель (54,5 %), який частіше діагностувався при тяжкій формі COVID-19 (66,7 %) та превалював у пацієнтів віком від 10 до 18 років (63,2 %). У пацієнтів з COVID-19 вікової групи від 10 до 18 років, статистично достовірними є наявність діареї та болю у животі ($p < 0,05$).

Причинами госпіталізації пацієнтів з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 були: підвищення температури тіла (100 %), негнійне ураження кон'юнктив (94 %), поліморфна екзантема (87,8 %), діарейний синдром (63,64 %), абдомінальний (больовий) синдром (63,63 %), набряковий синдром (42,4 %). Сухий кашель турбував третину (39,4 %) пацієнтів.

Тяжкість перебігу COVID-19 у дітей оцінювалася відповідно до критеріїв, запропонованих у науковій праці «Протокол діагностики та лікування COVID-19 для педіатричних пацієнтів». Згідно з цими критеріями, було визначено кілька форм захворювання: асимптомна форма: характеризується відсутністю клінічних проявів та ознак ураження легень на рентгенограмі, при позитивному ПЛР на SARS-CoV-2; легка форма: супроводжується лише легкими симптомами, такими як лихоманка або її відсутність, втома, міалгія, кашель, біль у горлі, нежить, чхання, а також іноді такі симптоми, як нудота, блювання, біль у животі та діарея; середньо-тяжка форма: характеризується клінічними ознаками пневмонії, стійкою гарячкою, кашлем та змінами при аускультатії легень. Можлива наявність ознак пневмонії без дистресу або ураження легень без інших клінічних симптомів; тяжка форма: включає: початкові респіраторні симптоми можуть, які можуть супроводжуватися розладами з боку ШКТ, такими як діарея. Клінічне погіршення зазвичай відбувається за тиждень з розвитком дихальної недостатності та гіпоксемії (насичення крові киснем $[SpO_2] < 94\%$); критично-тяжка форма: характеризується стрімким погіршенням стану з ураженням дихальної системи, розвитком ГРДС, шоком, енцефалопатією, ураженням міокарда, серцевою недостатністю, коагулопатією, гострим ураженням нирок та поліорганною дисфункцією. Критерії середньо-тяжкого, тяжкого та критично-тяжкого стану пацієнта були визнані як покази до госпіталізації²⁴⁷.

Для визначення випадку та встановлення діагнозу МЗС, асоційованого з SARS-CoV-2 у дітей та підлітків в Україні застосовуються критерії ВООЗ, які впроваджені в наказі МОЗ України № 638 «Надання медичної допомоги для лікування коронавірусної хвороби (COVID-19)» згідно з Міжнародною класифікацією хвороб (МКХ-10), в якій це захворювання представлене у розділі "Мультисистемний запальний синдром при COVID-19".

Критерії діагностики МЗС, асоційованого з SARS-CoV-2 включають: наявність лихоманки $\geq 38,0^\circ \text{C}$ тривалістю більше 72 годин; лабораторні ознаки запалення (підвищення рівнів СРП, фібриногену, прокальцитоніну, Д-димеру, феритину, лактат дегідрогеназа (ЛДГ) або ІЛ-6, збільшена ШОЕ, підвищений рівень нейтрофілів, знижений – лімфоцитів та низький вміст альбуміну); доказами тяжкості клінічного перебігу захворювання, яке потребує госпіталізації, з ураженням більше двох органів (серцевої, дихальної, ниркової, шлунково-кишкової, покривної, нервової та системи крові); наявністю двох з таких ознак: 1) висип або двосторонній негнійний кон'юнктивіт або ознаки запалення слизово-шкірної оболонки (ротової порожнини, рук або ніг); 2) гіпотензія або шок; 3) ознаки міокардіальної дисфункції, перикардиту, вальвуліту або коронарних порушень (включаючи результати ЕКГ або підвищення тропоніну/N-кінцевого пропептиду натрійуретичного гормону В-типу (NT-proBNP)); 4) докази коагулопатії (за прототромбіновим часом (РТ), частковим (парціальний) тромбoplastиновим часом (РТТ), підвищеним рівнем Д-димеру); 5) гострі шлунково-кишкові розлади (діарея, блювота або біль у животі); лабораторне підтвердження COVID-19 (ПЛР з використанням зворотної транскрипції (RT-PCR), тест на антиген або позитивний серологічний тест) або ймовірний контакт з хворими на COVID-19 впродовж останніх 4 тижнів від початку симптомів.

²⁴⁷ A. P. de C. Panzeri Carlotti, W. B. de Carvalho, C. Johnston, I. S. Rodriguez, and A. F. Delgado, "Covid-19 diagnostic and management protocol for pediatric patients," *Clinics*, vol. 75, pp. 1–5, 2020, doi: 10.6061/CLINICS/2020/E1894.

Критеріями виключення є запалення бактеріальної етіології, включаючи бактеріальний сепсис, стафілококовий або стрептококовий синдром токсичного шоку²⁴⁸.

2.2. Використані методи лабораторної діагностики COVID-19 та МЗС, асоційованого з SARS-CoV-2

Показники загального аналізу крові визначалися в клініко-діагностичному відділенні клініко-бактеріологічних лабораторіях КНП ЛОР «ЛОІКЛ» та КНП ЛОР ЛОДКЛ «ОХМАТДИТ». Біохімічні та бактеріологічні дослідження проводилися на базі клініко-біохімічних та клініко-бактеріологічних лабораторій тих самих установ.

2.2.1. Молекулярно-біологічні методи дослідження

Для лабораторної діагностики SARS-CoV-2 використовували ПЛР у режимі реального часу (rRT-PCR), за допомогою якої в мазку з носоглотки обстежених пацієнтів визначали РНК SARS-CoV-2, використавши реагенти BAG Diagnostics (Німеччина) на аналізаторі CFX-96 BioRad (США).

Ампліфікатор CFX96 Touch від Bio-Rad, США, призначений для реалізації полімеразної ланцюгової реакції (ПЛР) в режимі реального часу. Він обладнаний шестиканальною системою детекції, що забезпечує високу швидкість і гнучкість ПЛР-діагностики.

Тест RIDA® GENE SARS-CoV-2 представляє собою мультиплексну RT-ПЛР в реальному часі для прямого якісного виявлення РНК коронавірусу (SARS-CoV-2) із зразків з носа/горла людей із симптомами респіраторної інфекції. Виявлення відбувається в одностадійному форматі ПЛР у реальному часі, де зворотна транскрипція (RT) і ПЛР проводяться в одному реакційному флаконі. Фрагменти гена SARS-CoV-2 (ген E) ампліфікуються в процесі ПЛР у реальному часі. Детекція відбувається за допомогою зондів гідролізу, які взаємодіють з ампліконом, визначаючи кількість ампліконів за флуоресцентним сигналом.

Дослідження проводилися у Державна установа «Львівський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України» під керівництвом генерального директора Іванченко Н.О. Виконавці: завідувач вірусологічної лабораторії Романюк У.А. та к.мед.н. Семенишин О.Б.

2.2.2. Імуноферментний аналіз для визначення концентрації IgM, IgA, IgG до SARS-CoV-2 у сироватці крові

Імуноферментний аналіз для визначення рівня IgM, IgA, IgG до SARS-CoV-2 у сироватках крові хворих визначали методом ІФА з використанням наборів: «Vitretest SARS-CoV-2 IgA», «Vitretest SARS-CoV-2 IgM», «Vitretest SARS-CoV-2 IgG-N, IgG-S», виробник Україна.

Обстеження проводилась у лабораторії Науково-дослідного інституту епідеміології та гігієни Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького (завідувач лабораторії – Кузьмінов Б.П.).

Визначення антитіл класу IgA до коронавірусу SARS-CoV-2 здійснюється за допомогою тест-системи «Vitretest SARS-CoV-2 IgA». Ця система призначена для якісного виявлення IgA антитіл до нуклеокапсидного антигена та spike-білка коронавірусу SARS-CoV-2 у зразках сироватки та плазми крові людини (ЕДТА, літій-гепарин) методом імуноферментного аналізу. Також тест-система використовується для напівкількісного обліку результатів за допомогою індексу позитивності. Метод визначення антитіл класу IgA, специфічних до SARS-CoV-2, в тест-системі

²⁴⁸ МОЗ України, “НАДАННЯ МЕДИЧНОЇ ДОПОМОГИ ДЛЯ ЛІКУВАННЯ КОРОНАВІРУСНОЇ ХВОРОБИ (COVID-19),” <https://moz.gov.ua/article/ministry-mandates/nakaz-moz-ukraini-vid-06042021--638-pro-vnesennja-zmin-do-protokolu--nadannja-medichnoi-dopomogi-dlja-likuvannja--koronavirusnoi-hvorobi-covid-19, 2021>.

«Vitrotest SARS-CoV-2 IgA» базується на принципі «непрямого» твердофазного ІФА у двоетапній інкубації. Чутливість тест-системи склала 97,3%, а специфічність – 99,3%. Індекс позитивності 1,1.

Імуноферментна тест-система «Vitrotest SARS-CoV-2 IgM» призначена для якісного визначення ІgM антитіл до нуклеокапсидного та Spike-білка коронавірусу SARS-CoV-2 у зразках сироватки та плазми крові людини (EDTA, літій-гепарин, цитрат натрію) за допомогою імуноферментного аналізу. Визначення антитіл класу ІgM в тест-системі "Vitrotest SARS-CoV-2 IgM" базується на принципі "ІgM-захвату" твердофазного ІФА у двоетапній інкубації. Тест-система використовує стрипований ІФА-планшет з моноклональними антитілами, специфічними до ІgM. Під час інкубації досліджуваних зразків відбувається зв'язування ІgM з антитілами на твердій фазі. Після відмивання незв'язаних компонентів додається кон'югат рекомбінантних антигенів SARS-CoV-2, що зв'язуються з утвореними імунними комплексами. Імунні комплекси виявляються за допомогою хромогену. Чутливість тест-системи склала 96,5%. Специфічність – 99,4%. Індекс позитивності 1,1.

Визначення антитіл класу ІgG, специфічних до SARS-CoV-2, у тест-системі «Vitrotest SARS-CoV-2 IgG» ґрунтується на принципі "непрямого" твердофазного імуноферментного аналізу (ІФА) у двоетапній інкубації. У лунках планшету засорбовані рекомбінантні антигени SARS-CoV-2 (S- та N- білки). Комплекси антиген-антитіло виявляються шляхом додавання розчину хромогену 3,3',5,5'-тетраметилбензидину (ТМБ) з перекисом водню. Після 30-хвилинної інкубації реакція зупиняється додаванням стоп-реагенту. Оптична густина (ОГ) в лунках визначається на спектрофотометрі при довжині хвилі 450/620-695нм. Значення ОГ, отримане для зразку, дозволяє виявити наявність або відсутність антитіл до SARS-CoV-2. Специфічність методу – 100%; чутливість та специфічність – 100%; індекс позитивності – 1,1.

2.2.3. Імуноферментний аналіз для визначення концентрації ІL-2, ІL-6, ІL-10 у сироватці крові

Рівень цитокінів (ІL-2, ІL-6, та ІL-10) у сироватці крові пацієнтів визначали методом ІФА з використанням тест-систем від ЗАТ "Вектор-Бест". Метод ґрунтується на твердофазному ІФА і використовує моноклональні антитіла до ІL-6 та «сендвіч» варіант з моно- та поліклональними антитілами до ІL-2 та ІL-10. Реакція відбувається в лунках, де іммобілізовані антитіла реагують з цитокінами в сироватках пацієнтів, утворюючи антиген-антитіло комплекс, який зв'язується з кон'югантом і фарбується розчином тетраметилбензидину. Ступінь забарвлення пропорційний концентрації цитокінів у досліджуваних зразках. Чутливість методу при визначенні інтерлейкіну-6 не перевищує 0,5 пг/мл. При визначенні інтерлейкіну -10 чутливість методу не перевищувала 1пг/мл. Чутливість методу при визначенні інтерлейкіну-2 – 2 пг/мл. Референтними значеннями були такі концентрації: для ІL-6 – до 2 пг/мл; для ІL-10 – до 5 пг/мл; для ІL-2 – від 0 до 10 пг/л.

Дизайн дослідження подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Дизайн дослідження

Термін	Вид клінічних, імунологічних та інструментальних досліджень
При госпіталізації	1. Загальний аналіз крові. 2. Біологічно-молекулярні дослідження (метод ПЛР на виявлення РНК вірусу SARS-CoV-2 в режимі реального часу (rRT-PCR)). Мазок з носоглотки. 3. Забір венозної крові для визначення біохімічних показників (прокальцитонін, СРП, коагулограма, Д-димер, феритин, тропонін І, протеїнограма). 4. Забір венозної крові для визначення імуноферментного аналізу (ІgA ІgM, ІgG до SARS-CoV-2; ІL-2, ІL-6, ІL-10). 5. Інструментальні методи обстеження: пульсоксиметрія, рентгенографія ОГК, КТ та УЗД легень, ЕКГ, ЕхоКГ).

Продовження таблиці 2.2

Термін	Вид клінічних, імунологічних та інструментальних досліджень
3 день стаціонарного лікування	За потреби: загальний аналіз та біохімічний аналіз крові.
6 день стаціонарного лікування	За потреби: 1. Повторний загальний аналіз та біохімічний аналіз крові; 2. Контрольне рентгенологічне обстеження ОГК при потребі.
7 день стаціонарного лікування	Імуноферментний аналіз (IL-2, IL-6, IL-10), забір венозної крові.
Термін	Вид клінічних, імунологічних та інструментальних досліджень
7-14 день хвороби	Імуноферментний аналіз - IgA, IgM, IgG до SARS-CoV-2, забір венозної крові.
15-30 день від початку хвороби	Імуноферментний аналіз - IgA, IgM, IgG до SARS-CoV-2, забір венозної крові.
31-90 день після перенесеного захворювання	Імуноферментний аналіз - IgM, IgG до SARS-CoV-2, забір венозної крові.
91-180 день після перенесеного захворювання	Імуноферментний аналіз - IgM, IgG до SARS-CoV-2, забір венозної крові.

2.2.4. Біохімічні методи дослідження крові

Біохімічні дослідження включали визначення біомаркерів, таких як Д-димер, Прокальцитонін, СРП, Феритин та Тропонін І. Для аналізу Д-димеру та Феритину використовували реагенти Siemens на аналізаторі Immulite від Siemens Healthcare (Німеччина). Прокальцитонін та Тропонін І визначалися на аналізаторі Roche Cobas від Roche (Німеччина), а СРП аналізувався за допомогою реагентів Roche на аналізаторі Roche Cobas від Roche (Німеччина) в лабораторії «Ескулаб». Для виконання цих аналізів використовувалися стандартизовані та акредитовані методи та обладнання. Дані обстеження проводилися в лабораторії «Ескулаб».

Феритин. Обладнання: IMMULITE 2000XPi. СОП: СОП_А_КДЛ_ІФА_25. Метод: Твердофазний двохстадійний хемілюмінесцентний імунометричний. Акредитація: Здійснено відповідно до вимог 15189:2015. ІНС: ІНС_ПРЕА_КДЛ_11.

СРП. Обладнання: Cobas Integra 400 plus, Cobas 6000 c501. СОП: СОП_А_КДЛ_БІО_42_I та СОП_А_КДЛ_БІО_42_II. Метод: Турбідиметричний з латексним підсиленням. Акредитація: Інформація відсутня. ІНС: ІНС_ПРЕА_КДЛ_02.

Д-димер. Обладнання: IMMULITE 2000XPi. СОП: СОП_А_КДЛ_ІФА_20. Метод: Твердофазний імуноферментний. Акредитація: ІНС_ПРЕА_КДЛ_39.

Прокальцитонін. Обладнання: Cobas 6000 модуль e601, DxI 800. СОП: СОП_А_КДЛ_ІФА_18_I та СОП_А_КДЛ_ІФА_18_II. Метод: Хемілюмінесцентний імунохімічний аналіз. Акредитація: Не акредитовано відповідно до вимог 15189:2015, але є сертифікація системи управління якістю на відповідність вимогам 9001:2015 на медичні послуги. ІНС: ІНС_ПРЕА_КДЛ_16.

Тропонін І. Обладнання: Cobas 6000 модуль e601. СОП: СОП_А_КДЛ_ІФА_32. Метод: Електрохімілюмінесцентний імуноаналіз. ІНС: ІНС_ПРЕА_КДЛ_17.

2.3. Інструментальні методи дослідження

Розвиток бронхо-легеневих ускладнень було верифіковано результатами рентгенологічного обстеження органів грудної клітки. В КНП ЛОР Львівська обласна дитяча клінічна лікарня «ОХМАТДИТ» рентгенологічне обстеження органів грудної клітки дітям проводилося на апараті

Iconos R100 N4583, рентгенограми оцінювалися візуальним методом лікарями рентгенологами: Жолінська Н. С, Жидяк З. В. Морська І. Я. та в КНП ЛОР «Львівська обласна інфекційна клінічна лікарня», лікарем Олійник О.М., за використання рентгенівської установки HF-51, відповідно до наказу МОЗ України № 294 від 04.06.07 р. «Гігієнічні вимоги до влаштування та експлуатації рентген-кабінетів та проведення рентгенпроцедур».

Сонографічне дослідження серця та легень проводилось в КНП ЛОР Львівська обласна дитяча клінічна лікарня «ОХМАТДИТ» з використанням ультразвукової системи Phillips Affiniti 30.

2.4. Методи статистичного аналізу результатів

Статистична обробка даних проводилася на персональному комп'ютері. Першочергово чисельні показники, перевірено на нормальність розподілу за допомогою критерію Шапіро-Уїлка. Дані, що відповідали нормальному розподілу, представляли у вигляді вигляді $M \pm SD$, де M — значення середнього, SD — стандартне відхилення. Дані, що за характером розподілу не відповідали нормальному, були представлені у вигляді медіани (серединне значення) та квантилей - Me [25%; 75%]. Для виявлення достовірності різниці для даних із нормальним розподілом використовували t критерій для непер'язаних груп, а для даних із негаусівським розподілом — U -критерій Манна-Уїтні. Різницю між групами якісних показників досліджували за допомогою таблиць частот та встановлювали наявність достовірності за допомогою критерію χ^2 -квадрат Пірсона.

При розрахунку коефіцієнтів парної кореляції було використано метод Пірсона (якщо дані були представлені кількісно), або метод Спірмена (якщо дані були представлені якісно або мали напівкількісний вигляд).

Різниця вибірок вважалась достовірною при $p < 0,05$. Якісні ознаки наведено у форматі відсотка осіб, які мали аналізований показник, та 95%-ого довірчого інтервалу, який розраховувався методом кутового перетворення Фішера.

Всі статистичні обрахунки проводилися із використанням програмного забезпечення RStudio v. 1.4.1106.

При побудові моделі прогнозування вірогідності тяжкого перебігу COVID-19, ризику розвитку легеневих ускладнень та коронарних судин у госпіталізованих дітей, застосовано метод мультифакторної та логістичної регресії (метод Forward LR Wald). Даний метод дозволяє спрогнозувати тяжкий перебіг COVID-19 залежно від поєднаної дії декількох факторних ознак, а також здійснювати персоніфіковане прогнозування для конкретної дитини.

Імовірність виникнення тяжкого перебігу COVID-19 (R) залежно від вибраних чинників обчислювалась за формулою 2.1:

$$R = \frac{1}{1+e^{-C}} * 100\% \quad (2.1)$$

де $e = 2,72...$ — основа натуральних логарифмів,

C — величина, обчислена за формулою 2.2:

$$C = K + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots \beta_n x_n, \quad (2.2)$$

де: K - константа,

β_i - коефіцієнти при кожному факторі,

x_i - значення факторів.

За межу згідно з якою здійснювали поділ на високий чи низький ризики, було прийнято 50,0%. Отримані коефіцієнти моделі аналізували за допомогою критерію χ^2 -квадрат (Chi-square).

Розрахунки проводили із використанням програмного забезпечення RStudio v. 1.1.442 та R Commander v.2.4-4.

3. КЛІНІЧНО-БІОХІМІЧНІ ТА ІМУНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ COVID-19 У ДІТЕЙ

3.1 Клінічні особливості COVID-19 у дітей з урахуванням тяжкості перебігу хвороби та віку

У дослідженні взяло участь 110 (76,92 %) пацієнтів з SARS-CoV-2, середній вік яких становив – 9,20 років [5,13; 14, 00]. Серед обстежених пацієнтів було 46 хлопців (41,8 %) та 64 дівчини (58,2 %). Середній вік хлопців – 10,25 років (3,58; 14,78), дівчат – 9,00 років (5,58; 13,93). Середньо-тяжка форма коронавірусної інфекції розвинулася у 80 (72,72 %) пацієнтів, середній вік яких становив 8,00 років [4,98; 13,08], тяжка у – 30 (27,27 %) пацієнтів, середній вік яких становив 12,05 років [7,65; 16,00], ($p < 0,05$).

Серед досліджуваних пацієнтів виявлено такі коморбідні стани: ожиріння – у шести пацієнтів (5,45 %), цукровий діабет першого типу – у п'яти осіб (4,55 %), бронхіальна астма – у трьох дітей (2,73 %), залізодефіцитна анемія – у трьох пацієнтів (2,73 %), atopічний дерматит – у трьох осіб (2,73 %). Ожиріння виявлено у п'яти пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19, що становило 16,67 % та в одного – з середньо-тяжким перебігом хвороби. Водночас цукровий діабет, на тлі якого розвинулась тяжка форма COVID-19, спостерігали лише в одного, тоді як, середньо-тяжкий перебіг діагностовано у чотирьох дітей з SARS-CoV-2. Бронхіальна астма, залізодефіцитна анемія та atopічний дерматит були фоновими патологіями в однієї дитини з тяжким COVID-19 та у двох зі середньо-тяжким.

Середня тривалість COVID-19 на догоспітальному етапі становила 4,00 дні [3,00; 7,00]. Середня тривалість лікування у стаціонарі становила 6,00 днів [5,00; 8,00] при середньо-тяжкому перебігу захворювання та 10,00 днів [7,00; 16,75] при тяжкому COVID-19, $p < 0.001$. Причиною госпіталізації дітей були: підвищена температура тіла, яка коливалася від 37,1 °C до 40,2 °C у 105 пацієнтів (95,5 %), загальна слабкість – у 101 (91,8 %), зниження апетиту – у 88 (80,0 %), біль голови – у 25 (22,7 %), біль у горлі – у 21 (19,1 %), нежить – у 7 (6,4 %), біль у м'язах – у чотирьох (3,6 %), сухий кашель – у 55 (50,0 %), вологий кашель – у 5 (4,5 %), відчуття серцебиття, пітливість, аносмія – у 6 (5,5 %), агевзія – у 5 (4,5 %), сонливість – у 4 (3,6 %), втрата свідомості, страх, неспокій, гіперестезія – в 1 (0,9 %), висип спостерігався тільки – у 2 дітей (1,8 %) третьої вікової групи (рис 3.1).

Загальна слабкість турбувала найчастіше пацієнтів другої вікової групи (5-10 років) і виявлена у 31 особи (93,9 %). У третій віковій групі загальна слабкість спостерігалась у 44 дітей (89,8 %). Ця клінічна ознака була вираженою у всіх дітей з тяжким перебігом COVID-19.

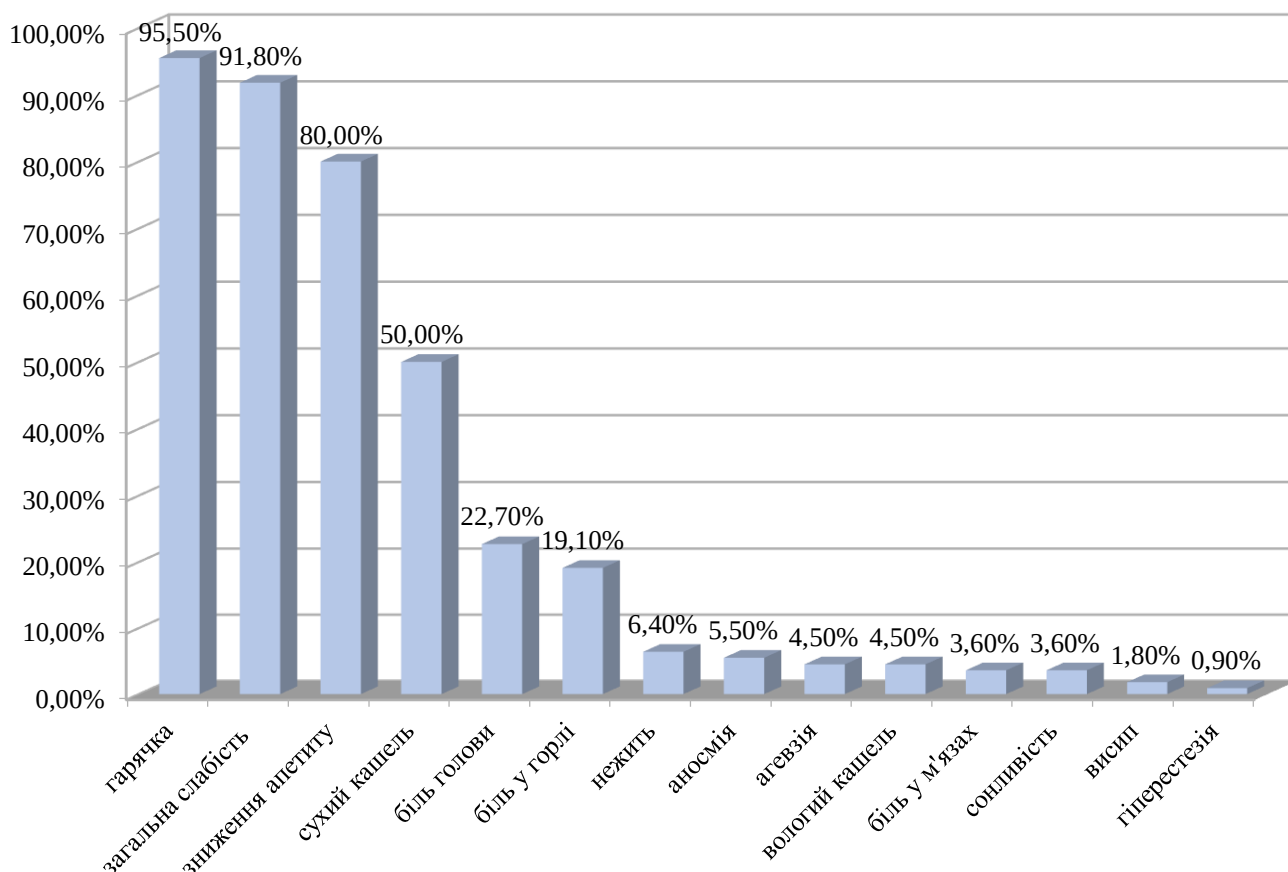


Рисунок 3.1. Узагальнена клінічна картина у пацієнтів з COVID-19

На момент госпіталізації у 41 (37,3 %) пацієнта з COVID-19 виявлено фебрильну температуру тіла (38,1 до 39 °С); гіпертермія (39,1 - 40,1°С) спостерігалась у 31 пацієнта (28,2 %); таку ж частку становили діти з субфебрильною температурою тіла (37,1 - 38,0 °С); гіперпірексія (> 40,1°С) діагностована у 2 пацієнтів. Проте у 5 осіб (4,5 %) температура тіла була нормальною.

На другий день стаціонарного лікування у більшості дітей – 67 (63,8 %) спостерігалась субфебрильна температура тіла; фебрильна гарячка утримувалась у 22 пацієнтів (21,0 %); гіпертермія – у 5 пацієнтів (4,8 %); не гарячувало 11 пацієнтів (10,5 %). Гарячка поступово знижувалася, сягнувши норми на п'ятий день у 13 пацієнтів (81,3%); субфебрильна – у 2 (12,5 %), фебрильна – в 1 (6,3 %). Серединна тривалість підвищеної температури становила 5 днів (3,00; 7,00). Температура тіла нормалізувалась на шостий день з моменту госпіталізації у 66,7 % пацієнтів досліджуваної групи з COVID-19 (рис. 3.2).

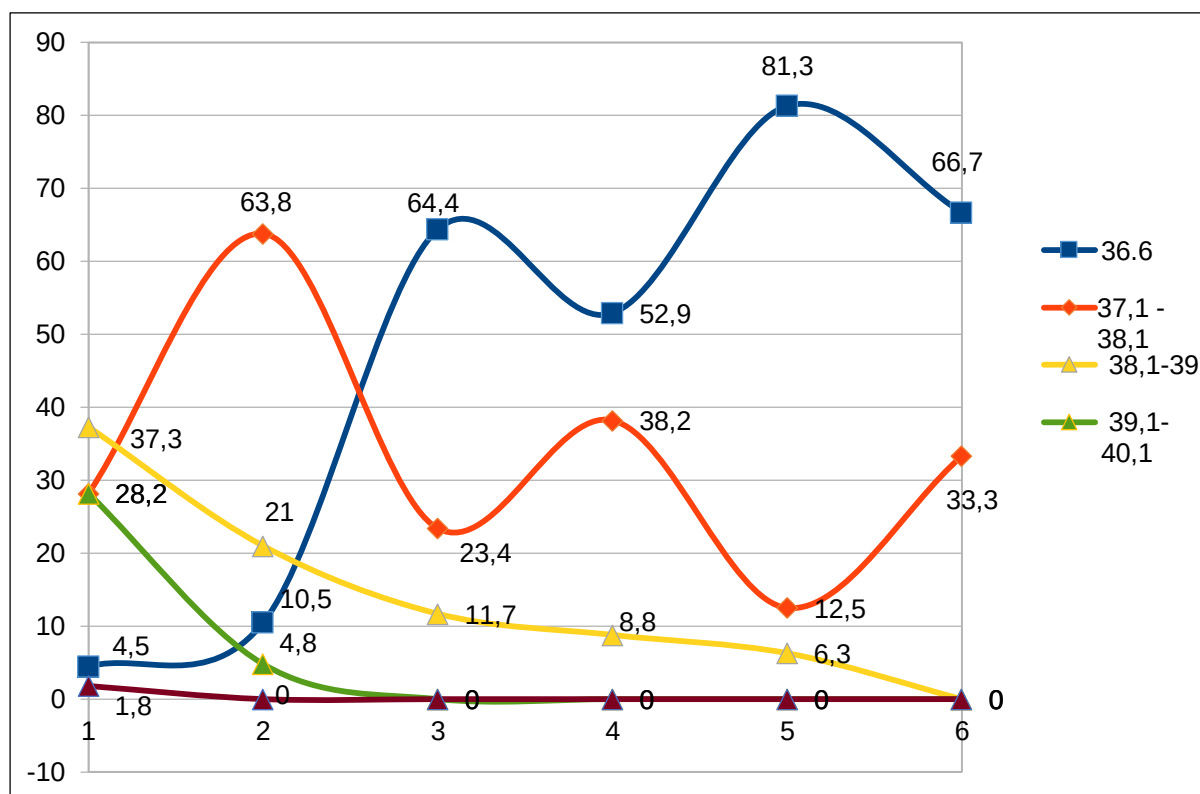


Рисунок 3.2. Динаміка гарячки у дітей з COVID-19

На біль голови скаржилась 21 дитина (42,9 %) третьої групи, на відміну від пацієнтів другої групи, де ця скарга виявлена у трьох дітей (9,1 %), ($p < 0,05$). При тяжкому перебігу COVID-19 біль голови турбував третину – 11 пацієнтів (36,7 %), на відміну від дітей з середньо-тяжким – 14 (17,5 %).

Біль у м'язах та суглобах не так часто турбував дітей різних вікових груп: двох (4,1 %) та одного (2,0 %) пацієнтів третьої вікової групи відповідно.

У третини пацієнтів (14 (28,6 %)) третьої вікової групи виявлено біль у горлі. Вдвічі менше ця клінічна ознака спостерігалась у дітей другої вікової групи. При тяжкій формі SARS-CoV-2 інфекції, біль у горлі діагностовано у семи пацієнтів (23,3 %).

При об'єктивному обстеженні у 64 пацієнтів (58,2 %) з SARS-CoV-2 спостерігалася гіперемія слизової оболонки ротоглотки. Цей симптом найчастіше виявлявся у пацієнтів першої вікової групи – у 19 дітей (67,9 %), дещо менше – у 20 осіб (60,6 %) другої вікової групи та у половини – 25 дітей (51,0 %) третьої вікової групи. Яскраво-червоні губи були у 2 пацієнтів (1,8 %). Обкладеним білим нальотом язик виявлено у 18 дітей (16,4 %). Також обкладений білим нальотом язик спостерігався у 5 пацієнтів (15,2 %) другої вікової групи та у 9 (18,4 %) – третьої.

Зміни кон'юнктив очей у вигляді кон'юнктивіту, склериту, крововиливів в склеру не спостерігались в жодної дитини.

Висип не був характерною ознакою у пацієнтів з COVID-19. Тільки у 2 дітей (1,8 %) спостерігався плямисто-папульозний та у 2 (1,8 %) – геморагічний висип у пацієнтів третьої вікової групи з тяжким перебігом SARS-CoV-2.

Сухий та вологий кашель турбував більше ніж половину пацієнтів з COVID-19: при тяжкому його перебігу – 20 осіб (66,7 %); при середньо-тяжкому – 40 (50,1 %). Кашель спостерігався залежно від віку пацієнта: у третій віковій групі кашель спостерігався найчастіше – 31 випадок (63,2 %); у першій групі – у 16 дітей (57,1 %); у другій групі – у 13 пацієнтів (34,4 %).

У 21 дитини (19,1 %) виявлено задишку змішаного характеру та експіраторну – у 10 (9,1 %). Під час аускультативної легень у більшості дітей (102 (92,7 %) виявлено жорстке дихання; ослаблене у різних ділянках легень – у 16 дітей (14 %). Сухі хрипи вислуховувались у 10 (9,1 %), вологі – у 3 (27 %), а крепітація – у 4 пацієнтів (3,6 %).

Задишку змішаного характеру діагностовано у чверті (12 (24,5 %)) пацієнтів третьої вікової групи; у 4 дітей (12,1 %) – другої групи; у 5 (17,9 %) – першої вікової групи. Аускультативна картина легень мало чим відрізнялась у пацієнтів другої та третьої вікових груп: у 30 пацієнтів (90,9 %) другої групи виявлено жорстке дихання та у 45 дітей (91,8 %) третьої групи; проте найчастіше – у 27 пацієнтів (96,4 %) першої вікової групи. Ослаблене дихання діагностовано у 9 пацієнтів третьої вікової групи, що становило 18,3 %. У 7 пацієнтів (14,3 %) цієї ж групи при аускультативній виявлено сухі хрипи та експіраторну задишку.

Задишка турбувала усіх пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19: змішана – 21 (70,0 %), експіраторна – дев'ять (30,0 %), на відміну від пацієнтів з середньо-тяжким перебігом, серед яких експіраторну задишку виявлено тільки в 1 пацієнта (1,3 %), ($p < 0,05$).

При аускультативній легень пацієнтів з різним перебігом COVID-19 жорстке дихання виявлено: при тяжкому – у 29 (96,7 %), при середньо-тяжкому – 73 (91,3 %). Ослаблене дихання у нижньо-середніх відділах з обох сторін діагностовано у 6 (20,0 %) пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19 та в 1 (1,3 %) зі середньо-тяжким, ($p < 0,05$). Характерні зміни при проведенні аускультативної легень у дітей різних вікових груп подано в таблиці 3.1.

При перевірці насиченості тканин киснем усім пацієнтам з COVID-19 виявлено, що середнє значення SpO_2 при диханні кімнатним повітрям становило $94,90 \pm 4,93$ % (min-69, max-99). У 29 (96,67 %) пацієнтів, які потребували оксигенотерапії, середнє значення SpO_2 становило $86,84 \pm 1,05$ % (min-69 та max-93). При оксигенотерапії середнє значення SpO_2 зросло до $96,83 \pm 2,44$ %.

Оксигенотерапія через лицеву маску була застосована у 29 пацієнтів. Додатково, шестеро дітей були підключені до штучної вентиляції легень (ШВЛ). Проте, у двох дітей, у яких спостерігалася критична гіпоксемія, яку не вдалося подолати за допомогою традиційної респіраторної підтримки, було з успіхом використано ЕКМО.

Таблиця 3.1

Аускультативна картина легень у пацієнтів з COVID-19 залежно від віку

Аускультативна картина в легенях	Вікові групи (роки)		
	$\geq 1 < 5$ абс. число (%)	$\geq 5 < 10$ абс. число (%)	$\geq 10 < 18$ абс. число (%)
Жорстке дихання	27 (96,4)	30 (90,9)	45 (91,8)
Ослаблене дихання у нижньо-середніх відділах зліва	0 (0,0)	1 (3,0)	3 (6,1)
Ослаблене дихання у нижньо-середніх відділах справа	1 (3,6)	1 (3,0)	3 (6,1)
Ослаблене дихання у нижньо-середніх відділах обох легень	2 (7,1)	2 (6,1)	3 (6,1)
Розсіяні сухі хрипи над обома легенями	1 (3,6)	2 (6,1)	7 (14,3)
Вологі хрипи у нижньо-середніх відділах обох легень	2 (7,1)	0 (0,0)	1 (2,0)
Крепітація	1 (3,6)	2 (6,1)	1 (2,0)

Одним із проявів COVID-19 у госпіталізованих дітей був диспепсичний синдром, який проявлявся: нудотою – у 2 пацієнтів (1,8 %), діареєю водянистого характеру від 1 до 3 разів – у 10 (9,1 %), частим водянистим стільцем (> 3 до 10 разів) – у двох (1,8 %); гемоколіт розвинувся в однієї дитини (0,9 %), біль в животі розлитого характеру турбував 12 осіб (10,9 %). Аналізуючи скарги з боку ШКТ у пацієнтів з COVID-19 третьої вікової групи, статистично достовірними є наявність водянистої діареї 1-3 рази, болю у животі розлитого характеру та болю навколо пупка ($p < 0,05$).

Особливості клінічних ознак ураження ШКТ залежно від вікових груп подано на рисунку 3.3.

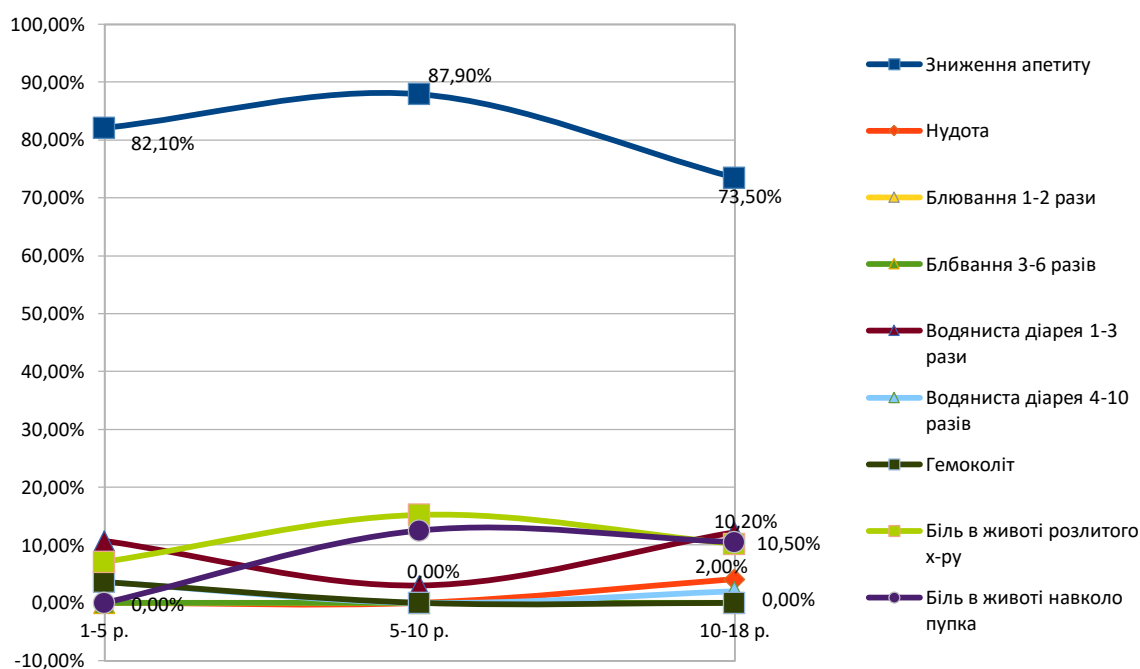


Рисунок 3.3. Симптоми диспепсичного синдрому у пацієнтів з COVID-19 у різних вікових групах

3.2 Динаміка показників загального аналізу крові у пацієнтів досліджуваної групи

У пацієнтів з SARS-CoV-2 при дослідженні загального аналізу крові виявлено, що середнє значення кількості лейкоцитів на момент госпіталізації становило $6,00 \times 10^9/\text{л}$ [4,12; 7,87]; у 25 осіб (22,72 %) спостерігалася лейкопенія, лейкоцитоз – у 4 (3,63%).

Значення кількості лейкоцитів коливались від $2,07 \times 10^9/\text{л}$ до $16,96 \times 10^9/\text{л}$ та від $1,84 \times 10^9/\text{л}$ до $18,95 \times 10^9/\text{л}$ при середньо-тяжких та тяжких формах хвороби відповідно. Середнє значення кількості лейкоцитів становило $6,16 \times 10^9/\text{л}$ [4,63; 7,66] та $5,35 \times 10^9/\text{л}$ [3,40; 7,90] при середньо-тяжкій та тяжкій формах відповідно ($p > 0,05$). У 14 пацієнтів (17,5 %) з середньо-тяжким перебігом COVID-19 спостерігалася лейкопенія, в той час, як лейкоцитоз виявлено у 2 осіб (2,5 %). Водночас в 11 (36,67 %) дітей з тяжким перебігом COVID-19 спостерігалася лейкопенія, у 3 (10,0 %) – лейкоцитоз.

Контроль кількості лейкоцитів проводився на третій день стаціонарного лікування. Середнє значення кількості лейкоцитів у пацієнтів COVID-19 становило $7,04 \times 10^9/\text{л}$ [3,72; 12,30]. При середньо-тяжкій формі середнє значення цього показника становило $3,74 \times 10^9/\text{л}$ [2,51; 7,93]; при тяжкій формі SARS-CoV-2 було майже вдвічі вищим, проте в межах норми, і становило $8,30 \times 10^9/\text{л}$ [5,33; 14,75] ($p < 0,05$). У 5 (16,67 %) дітей з тяжким перебігом COVID-19 спостерігався лейкоцитоз,

у трьох (3,0 %) – лейкопенія; при середньо-тяжкому перебігу лейкопенія виявлена у 5 (6,25 %), лейкоцитоз - в однієї (1,25 %) дитини.

При аналізі серединних значень кількості лейкоцитів $6,12 \times 10^9/\text{л}$ [5,44; 8,39], $6,85 \times 10^9/\text{л}$ [3,92; 7,90] та $5,29 \times 10^9/\text{л}$ [3,90; 7,00], у пацієнтів першої, другої та третьої вікових груп виявлено їх нормальні показники ($p > 0,05$). При контролі показників загального аналізу крові серединне значення кількості лейкоцитів у першій віковій групі зросло вдвічі, водночас у пацієнтів другої групи цей показник знизився майже удвічі, а у третій цей показник становив $6,21 \times 10^9/\text{л}$ [3,62; 8,30].

Серединне значення відсоткового показника нейтрофільних гранулоцитів в усіх пацієнтів з COVID-19 становило 59,05 % [47,13; 72,00]; у пацієнтів з середньо-тяжким перебігом – 56,50 % [46,20; 66,75] (при середньому значенні 56,72 %) та 68,00 % [59,03; 74,45] (при середньому значенні 63,61 %) – при тяжкому перебігу COVID-19. Серединне значення відсоткового показника нейтрофільних гранулоцитів у пацієнтів першої вікової групи було дещо вищим від вікової норми.

На момент госпіталізації у пацієнтів з COVID-19 серединне значення кількості тромбоцитів становило $215,00 \times 10^9/\text{л}$ [162,00; 273,00]; при середньо-тяжкому перебігу – $223,00 \times 10^9/\text{л}$ [174,00; 279,25]; при тяжкому – $185,00 \times 10^9/\text{л}$ [153,00; 260,00]. У 36 пацієнтів (32,73 %) спостерігалася тромбоцитопенія (min-16; max-179). Тромбоцитопенію виявлено у 14 пацієнтів (46,67 %) (min-16; max-179) з тяжким перебігом COVID-19; з середньо-тяжким – у 22 пацієнтів (27,5 %), з мінімальною кількістю тромбоцитів $48,0 \times 10^9/\text{л}$.

Середні/серединні значенні показників загального аналізу крові у різних вікових групах подано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Динаміка показників периферичної крові у пацієнтів з COVID-19 у трьох вікових групах (з урахуванням $M \pm SD/Me$ [25%; 75%])

Показник	Вік (роки)	$M \pm SD/Me$ [25%; 75%]	Min	Max	p
Гемоглобін при госпіталізації (г/л)	$\geq 1 < 5$	$118,93 \pm 16,79$	66	150	$p < 0,000^*$
	$\geq 5 < 10$	$122,44 \pm 12,34$	93	145	
	$\geq 10 < 18$	$131,06 \pm 18,17$	41	155	
Гемоглобін через три дні (г/л)	$\geq 1 < 5$	$116,60 \pm 22,47$	90	150	$p > 0,05$
	$\geq 5 < 10$	$123,20 \pm 5,81$	113	127	
	$\geq 10 < 18$	$122,36 \pm 23,69$	52	149	
Лейкоцити при госпіталізації ($\times 10^9/\text{л}$)	$\geq 1 < 5$	6,12 [5,44; 8,39]	3,32	18,95	$p > 0,05$
	$\geq 5 < 10$	6,85 [3,92; 7,90]	2,07	14	
	$\geq 10 < 18$	5,29 [3,90; 7,00]	1,84	16,96	
Лейкоцити через три дні ($\times 10^9/\text{л}$)	$\geq 1 < 5$	13,40 [9,82; 18,60]	6,9	26,2	$p > 0,05$
	$\geq 5 < 10$	3,92 [3,56; 11,20]	3,2	24,7	
	$\geq 10 < 18$	6,21 [3,62; 8,30]	2,09	16	

Продовження таблиці 3.2

Показник	Вік (роки)	M±SD/Me [25%; 75%]	Min	Max	p
Нейтрофільні гранулоцити при госпіталізації (%)	≥1 <5	47,00 [39,50; 63,20]	12,3	88	p<0,000*
	≥5 <10	57,32 ± 14,09	34	88	
	≥10 <18	65,20 ± 15,52	23	95	
Нейтрофільні гранулоцити через три дні (%)	≥1 <5	70,00 [58,75; 74,00]	31	80	p>0,05
	≥5 <10	65,40 ± 17,77	44	88	
	≥10 <18	68,17 ± 14,83	42	91	
Лімфоцити при госпіталізації (%)	≥1 <5	47,04 ± 19,52	9	82,1	p<0,002*
	≥5 <10	41,00 [30,00; 45,20]	5,29	67,6	
	≥10 <18	30,00 [20,00; 40,00]	4	66,4	
Лімфоцити через три дні (%)	≥1 <5	36,00 [14,50; 59,00]	10	68	p>0,05
	≥5 <10	37,00 [20,00; 46,00]	11	56	
	≥10 <18	28,50 [14,50; 36,48]	5	55	
Тромбоцити при госпіталізації (×109/л)	≥1 <5	248,00 [186,00; 325,00]	16	544	p<0,005*
	≥5 <10	231,34 ± 76,53	48	377	
	≥10 <18	179,00 [153,00; 252,00]	52	385	
Тромбоцити через три дні (×109/л)	≥1 <5	207,50 [120,00; 276,75]	36	306	p>0,05
	≥5 <10	280,00 [197,00; 365,00]	117	415	
	≥10 <18	214,00 [177,50; 318,00]	123	549	

Примітка. * – різниця достовірна, ** - у випадку негаусівського розподілу результати наведені у вигляді Me [25%; 75%]

3.3. Маркери запалення та їх динаміка у пацієнтів з COVID-19 залежно від тяжкості хвороби та віку

У дітей з COVID-19 проводилася діагностика запальних маркерів захворювання.

Середнє значення рівня СРП в усіх пацієнтів з COVID-19 при госпіталізації було в межах норми і становило 6,00 мг/л [4,00; 12,00].

На момент госпіталізації пацієнтів середнє значення рівня СРП становило 6,00 мг/л [4,00; 6,00] при середньо-тяжкій формі та при тяжкій – 12,00 мг/л [6,00; 96,00] (p < 0,05). У п'яти (6,25 %) пацієнтів з середньо-тяжким перебігом COVID-19 виявлено підвищений рівень СРП та у 16 (53,3 %) – з тяжким.

У динаміці, на третій день лікування, цей показник у всіх дітей з SARS-CoV-2 становив 12,00 мг/л [5,00; 24,00], при середньо-тяжкій формі хвороби – 6,00 мг/л [4,00; 24,00] та при тяжкій – 18,00 мг/л [6,00; 48,00] ($p > 0,05$).

Середнє значення рівня СРП у дітей різних вікових груп на момент госпіталізації становило: у пацієнтів віком від 1 до 5 років – 6,00 мг/л [4,00; 6,00]; віком від 5 до 10 років – 4,00 мг/л [3,00; 12,00]; від 10 до 18 років – 6,00 мг/л [4,00; 12,00]. Максимальний показник СРП у всіх вікових групах був однаковим – 192 мг/л серед 25, 32 та 45 дітей першої, другої та третьої вікових груп, відповідно, ($p > 0,05$). Через три дні цей показник наростав і становив: у першій групі – 15,00 мг/л [4,00; 30,00]; у другій – 24,00 мг/л [18,00; 72,00] та 6,00 мг/л [4,00; 24,00] – у третій віковій групі ($p > 0,05$).

Одним з важливих лабораторних критеріїв запалення є прокальцитонін. Середнє значення рівня прокальцитоніну в усіх пацієнтів з COVID-19 при поступленні на стаціонарне лікування становило 0,06 нг/мл [0,05; 0,55]. Статистично достовірними виявились результати середнього значення рівня прокальцитоніну на момент госпіталізації залежно від тяжкості перебігу SARS-CoV-2: 0,42 нг/мл [0,05; 1,34] – у пацієнтів з тяжким перебігом хвороби та 0,05 нг/мл [0,03; 0,06] – у дітей зі середньо-тяжким перебігом ($p < 0,05$). У восьми (26,67 %) пацієнтів з тяжким перебігом виявлено високі рівні прокальцитоніну, з максимальним значенням 18,01 нг/мл; при середньо-тяжкому – у чотирьох (5 %).

У динаміці цей показник наростав і середнє його значення також різнилося – 0,12 нг/мл [0,06; 2,95], а у пацієнтів з різним ступенем тяжкості захворювання становило: 0,05 нг/мл [0,04; 0,05] (при середньому значенні 0,05 нг/мл) при середньо-тяжкому перебігу хвороби та при тяжкому – 0,44 нг/мл [0,11; 7,18]. Серед досліджуваних пацієнтів у трьох вікових групах також спостерігалися відмінності: середнє значення цього показника на момент госпіталізації було найвищим у другій віковій групі і становило – 1,64 нг/мл [0,85; 4,32], незначно вищий норми – 0,09 нг/мл [0,05; 0,21] виявлено у пацієнтів першої вікової групи. Водночас у пацієнтів третьої вікової групи середнє значення рівня прокальцитоніну було нижче референтних значень і становило 0,05 нг/мл [0,04; 0,32] ($p > 0,05$). У динаміці, на третій день лікування, рівень середнього значення цього показника також наростало і становило: у першій віковій групі – 8,86 нг/мл [0,04; 26,97]; 0,76 нг/мл [0,40; 2,22] – у другій групі та 0,12 нг/мл [0,10; 0,12] – у третій віковій групі (рис. 3.4).

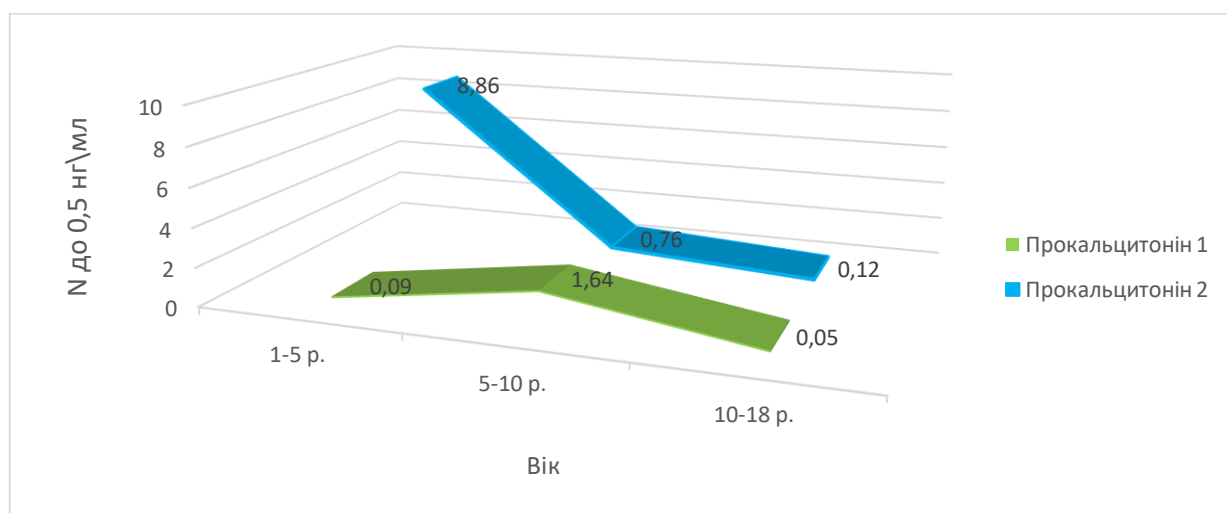


Рисунок 3.4. Динаміка середнього значення рівня прокальцитоніну на момент госпіталізації (1) та на третю добу (2) у дітей з COVID-19 у трьох вікових групах

У дітей з різним перебігом COVID-19 середнє значення ШОЕ на час госпіталізації було в межах норми і становило 5,00 мм/год [4,00; 9,00]; у пацієнтів з середньо-тяжким перебігом – 5,00 мм/год [4,00; 7,75]; з тяжкою – 6,00 мм/год [4,00; 20,00] з мінімальним його значенням 1 мм/год та максимальним – 30 мм/год; при середньо-тяжкому – 2 мм/год і 43 мм/год – при тяжкому перебігу COVID-19 ($p > 0,05$). У динаміці (на третій день лікування) – 9,00 [4,50;15,00]; значення цього показника були наступними: 5,00 мм/год [4,00; 8,50] при середньо-тяжкому перебігу хвороби та – 11,50 мм/год [7,75; 19,50] у пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19 ($p > 0,05$).

У різних вікових групах досліджуваних пацієнтів рівень ШОЕ при госпіталізації у деяких пацієнтів нарастив, проте середнє його значення не перевищувало вікову норму (табл. 3.3). Максимальним його значенням – 43 мм/год спостерігалось у пацієнтів другої вікової групи (серед 32 обстежуваних), мінімальне – 2 мм/год. У третій віковій групі дещо нижчим було максимальнє значення – 40 мм/год з мінімальним його показником – 1 мм/год (у 49 обстежених). У першій віковій групі найвища ШОЕ була 25 мм/год, з мінімальним значенням цього показника – 1 мм/год (серед 26 обстежуваних пацієнтів). Тоді як у динаміці, на третій день лікування у дітей першої, другої та третьої вікових груп, максимальні та мінімальні значення ШОЕ були такими: 14 мм/год, 2 мм/год; 34 мм/год, 3 мм/год та 45 мм/год, 2 мм/год, у першій, другій та третій вікових групах, відповідно.

Таблиця 3.3

Динаміка значення ШОЕ у пацієнтів з COVID-19 у різних вікових групах. Дані представлені у вигляді Ме [25%; 75%]

Показник	Вік (роки)	Ме [25%; 75%]	Min	Max	p
ШОЕ (мм/год) при госпіталізації	$\geq 1 < 5$	5,00 [4,00; 7,50]	1	25	>0,05
	$\geq 5 < 10$	6,00 [4,00; 8,50]	2	43	
	$\geq 10 < 18$	6,00 [4,00; 10,00]	1	40	
ШОЕ (мм/год) на третій день лікування	$\geq 1 < 5$	9,00 [6,50; 11,50]	4	14	>0,05
	$\geq 5 < 10$	5,50 [3,75; 13,75]	3	34	
	$\geq 10 < 18$	10,50 [5,00; 19,50]	2	45	

Дослідження ІЛ-6 проводилося у 53 пацієнтів з COVID-19. Середнє значення становило 1,20 пг/мл [0,50; 7,00] (при середньому значенні 12,17 пг/мл). У пацієнтів з середньо-тяжким перебігом хвороби середнє значення ІЛ-6 становило 1,20 пг/мл [0,55; 2,15] (при середньому – 10,84 пг/мл); з тяжким перебігу – 7,50 пг/мл [0,65; 18,50] у 39 та 14 досліджуваних, відповідно ($p < 0,05$). Проте максимальний рівень – 300 пг/мл виявлено у одного пацієнта зі середньо-тяжким перебігом COVID-19. При повторному дослідженні (на сьомий день лікування) середнє значення рівня цього показника становило 0,00 пг/мл [0,00; 1,97]. Нами встановлено, що серединні рівні ІЛ-6 залежали від тяжкості хвороби: при середньо-тяжкому перебігу хвороби ІЛ-6 був нижче референтних значень, тоді як при тяжкому COVID-19 становив 3,95 пг/мл [1,97; 5,92].

У вікових групах серединні значення рівня ІЛ-6 значно відрізнялися. Найвищим цей показник виявився у другій віковій групі і становив 1,85 пг/мл [1,35; 15,60], з максимальним його значенням

– 300 пг/мл з 17 обстежених пацієнтів. У першій та третій вікових групах цей показник становив: 1,80 пг/мл [0,00; 7,00] та 1,15 пг/мл [0,70; 2,90]; max – 29 пг/мл та max – 113 пг/мл, відповідно.

У 56 обстежуваних пацієнтів IL-2, як при первинному, так і при повторному заборі з різним перебігом хвороби, був негативним. Зокрема у дітей як з тяжким, так і з середньо-тяжким перебігом COVID-19 IL-2 був негативним.

Дослідження показника IL-10 крові, проведеного у 61 пацієнта з різним перебігом COVID-19. Середнє значення IL-10 становило $6,64 \pm 30,24$ пг/мл. У 47 пацієнтів зі середньо-тяжким перебігом COVID-19 середнє значення IL-10 $1,87 \pm 6,37$ пг/мл, та у 14 дітей з тяжким перебігом хвороби середнє значення цього показника становило $22,64 \pm 60,97$ пг/мл, ($p < 0,05$).

У 15 пацієнтів першої вікової групи середнє значення IL-10 з початком лікування становило $5,67 \pm 12,08$ пг/мл (min-0; max-35) з мінімальним значенням – 0 пг/мл та максимальним – 35 пг/мл. Середнє значення IL-10 у 17 пацієнтів другої вікової групи було нижчим і становило $3,53 \pm 7,91$ пг/мл (min-0; max-22). Найвищим виявилось середнє значення IL-10 у 29 пацієнтів третьої вікової групи – $8,97 \pm 42,87$ пг/мл. У динаміці вдалося (на сьомий день лікування) визначити середнє значення IL-10 у дев'яти пацієнтів третьої вікової групи, яке становило 45,00 пг/мл [22,50; 67,50] (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Середнє значення рівня IL-6, IL-10, IL-2 у пацієнтів при госпіталізації у трьох вікових групах. Дані представлені $M \pm SD$

Нозологія	Вікова група (роки)	IL-6 до 2 пг/мл	IL-10 до 5 пг/мл	IL-2 (0-10) пг/мл
COVID-19	$\geq 1 < 5$	1,80 [0,00; 7,00] *	$5,67 \pm 12,08$	0,00 [0,00; 0,00] *
	$\geq 5 < 10$	1,85 [1,35; 15,60] *	$3,53 \pm 7,91$	0,00 [0,00; 0,00] *
	$\geq 10 < 18$	1,15 [0,70; 2,90] *	$8,97 \pm 42,87$	0,00 [0,00; 0,00] *
МЗС, асоційований з SARS-CoV-2	$\geq 1 < 5$	12,50 [9,75; 13,55] *	$3,75 \pm 7,50$	0,00 [0,00; 0,00] *
	$\geq 5 < 10$	1,20 [0,60; 150,60] *	$76,25 \pm 124,32$	0,00 [0,00; 0,00] *
	$\geq 10 < 18$	14,80 [12,30; 25,40] *	$13,33 \pm 23,58$	0,00 [0,00; 0,00] *

Примітка. * – у випадку негаусівського розподілу результати наведені у вигляді Me [25%; 75%]

3.4. Визначення Д-димеру та феритину у пацієнтів з SARS-CoV-2 інфекцією

Д-димер є одним із важливих маркерів згортання крові і має важливу діагностичну цінність для встановлення ступеня його тяжкості. Тромботичний розлад згортання частіше зустрічається у тяжких випадках SARS-CoV-2.

Середнє значення рівня Д-димеру в усіх пацієнтів з COVID-19 при поступленні становило 733,00 нгФЕОд/мл [231,00; 1246,00] (при середньому його значенні 1462,11 нг ФЕО/мл). Статистично

достовірними виявились результати середнього значення рівня Д-димеру на момент госпіталізації залежно від тяжкості перебігу: 791,00 нгФЕОд/мл [540,00; 1844,50] у пацієнтів з тяжким перебігом хвороби та 368,00 нгФЕОд/мл [149,25; 921,25] – у дітей з COVID-19 зі середньо-тяжким перебігом ($p < 0,05$). Значення Д-димеру у пацієнтів з тяжким COVID-19 наростало у динаміці захворювання і середнє його значення на 3-й день стаціонарного лікування становило 1206,00 нгФЕОд/мл [980,00; 2855,00]. Водночас значення Д-димеру у пацієнтів з середньо-тяжким COVID-19 знижувалось зі середнім його значенням – 425,00 нгФЕОд/мл [397,00; 812,50], ($p > 0,05$).

Ми проводили оцінку рівня Д-димеру залежно від віку пацієнта. Встановлено, що на момент поступлення найвище середнє значення Д-димеру у пацієнтів з COVID-19 другої вікової групи становило 808,50 нгФЕОд/мл [173,00; 1437,75], тоді як у дітей першої – 642,50 нгФЕОд/мл [217,75; 1240,75] та третьої – 575,00 нгФЕОд/мл [336,00; 1230,50], ($p > 0,05$).

Середнє значення рівня феритину у пацієнтів з COVID-19 при поступленні становило 63,30 нг/мл [37,15; 207,50]. У динаміці середнє значення цього показника становило – 203,00 нг/мл [74,20; 390,00].

У пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19 середнє значення рівня феритину становило 195,00 нг/мл [49,75; 344,00], а у дітей зі середньо-тяжким перебігом хвороби – 54,55 нг/мл [35,18; 94,10], ($p > 0,05$). Повторне визначення феритину проводилося на третій день лікування пацієнтів, середнє його значення у дітей з тяжким перебігом SARS-CoV-2 було вищим ніж в день госпіталізації і становило 232,10 нг/мл [73,20; 667,50].

Середнє значення рівня феритину у третій віковій групі становило 63,30 нг/мл [37,15; 128,75], а у першій та другій вікових групах – 84,20 нг/мл [49,75; 412,25] та 51,05 нг/мл [23,93; 267,25] відповідно ($p > 0,05$) (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Середнє значення рівня Д-димеру у пацієнтів з COVID-19 та МЗС з урахуванням віку

Д-димер при госпіталізації	COVID-19	$\geq 1 < 5$	642,50 [217,75; 1240,75]
		$\geq 5 < 10$	808,50 [173,00; 1437,75]
		$\geq 10 < 18$	575,00 [336,00; 1230,50]
	МЗС, асоційований з SARS-CoV-2	$\geq 1 < 5$	2938,50 [2897,00; 3197,50]
		$\geq 5 < 10$	4280,00 [2016,00; 5723,50]
		$\geq 10 < 18$	4661,00 [3026,50; 5610,50]
Д-димер в динаміці через три дні	COVID-19	$\geq 1 < 5$	1845,00 [1312,50; 4874,00]
		$\geq 5 < 10$	5072,00 [5072,00; 5072,00]
		$\geq 10 < 18$	1000,00 [617,75; 1201,50]
	МЗС, асоційований з SARS-CoV-2	$\geq 1 < 5$	----
		$\geq 5 < 10$	----
		$\geq 10 < 18$	1060,00 [724,50; 3462,50]

3.5. Кінетика IgM, IgA, IgG до SARS-CoV-2 у дітей з COVID-19 залежно від тяжкості перебігу хвороби та віку

При дослідженні IgM до SARS-CoV-2 на першому тижні захворювання у 31 пацієнта (28,19 %) виявлено позитивний результат, зі середнім показником $4,22 \pm 1,21$ (min-1,32 max-14,63). У всіх пацієнтів з COVID-19 середнє значення IgM було негативним і становило 0,24 [0,14; 1,39] (min-0,03, max-14,63). При дослідженні IgM до SARS-CoV-2 на першому тижні захворювання у 31 пацієнта (28,19%) виявлено позитивний результат, зі середнім показником $4,41 \pm 0,66$ ІП (min-1,32 max-14,63).

На другому тижні (8-14 дні) середні значення IgM до SARS-CoV-2 теж були негативними і становили 0,49 [0,30; 2,87] (min-0,07, max-14,63). У 28 (25,45 %) пацієнтів виявлено позитивний результат IgM до SARS-CoV-2 $4,91 \pm 1,05$ (min-1,93, max-14,63). Позитивне середнє значення рівня IgM до SARS-CoV-2 спостерігалось у терміні з 15 до 30 день після перших проявів хвороби і становило 2,50 [0,56; 6,21] (min-0,07, max-12,66). У чотирьох (3,64 %) пацієнтів рівень IgM виявився негативним. Наступні визначення IgM до SARS-CoV-2, проведені у термін з 31 по 90 день та після третього місяця вказали негативні результати зі середніми значеннями 0,52 [0,19; 0,76] та 0,05 [0,02; 0,09], відповідно.

Середні значення рівнів IgA до SARS-CoV-2 впродовж першого, другого тижнів та з 15 по 30 день були негативними і становили 0,13 [0,10; 0,33] (min-0,05, max-3,93); 0,22 [0,14; 0,40] (min-0,08, max-2,22); та 0,33 [0,24; 1,00] (min-0,13, max-6,35), відповідно. Після 30 дня захворювання середнє значення рівня IgA до SARS-CoV-2 становило 0,24 [0,20; 0,28] (min-0,11, max-0,35).

Середній рівень IgG-N SARS-CoV-2 на першому тижні хвороби становив 0,24 [0,13; 3,58] (min-0,03, max-13,17). Наростання рівня цього показника спостерігалось з другого тижня хвороби і становило 1,13 [0,52; 3,17] (min-0,18, max-7,31) з піком його значення 5,68 [2,39; 8,86] (min-0,88, max-10,11) у період до трьох місяців. Впродовж шести місяців цей показник зменшився більше ніж у два рази до рівня 1,46 [0,57; 4,51] (min-0,12, max-12,21) у 35 пацієнтів.

В усі періоди дослідження середні значення рівня антитіл до Spike- білку наростали і в період до трьох місяців після перенесеної хвороби були найвищими і становили 8,85 [8,03; 9,34] (min-0,18, max-11,80). Після третього місяця спостерігається незначна тенденція до зниження – 7,9 [6,54; 8,62] (min-0,88, max-9,88). Результати досліджень IgM, IgA, IgG-N та IgG-S до SARS-CoV-2 у сироватці крові пацієнтів представлені на рисунку 3.5.

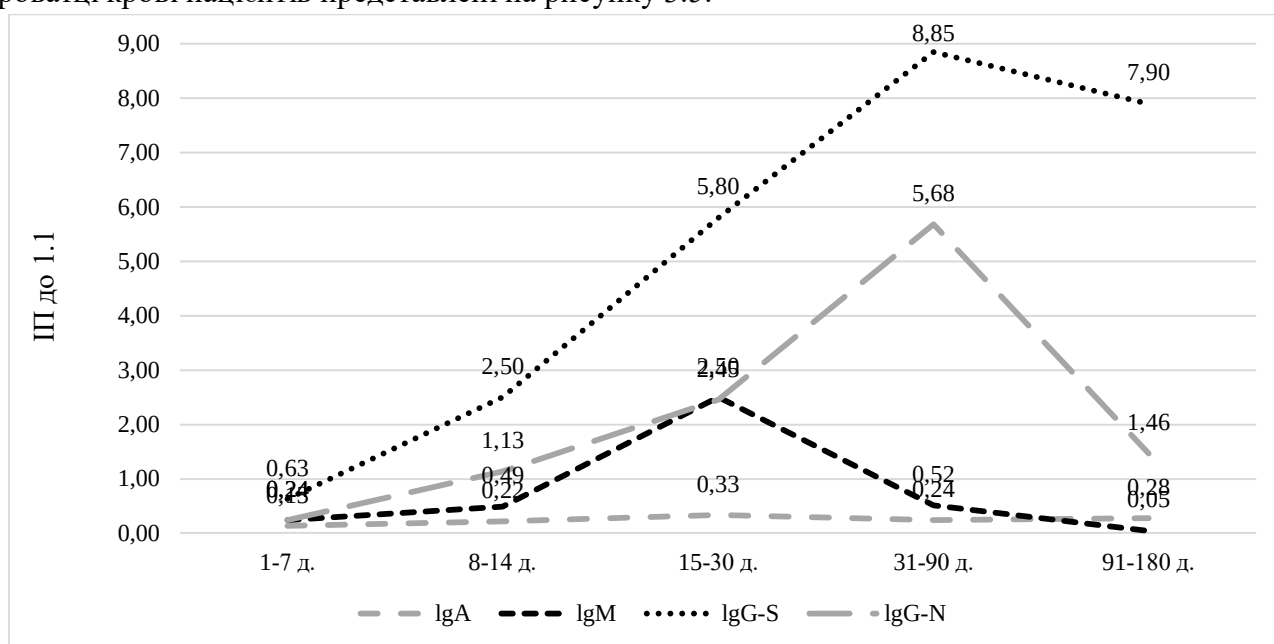


Рисунок 3.5. Середні значення IgM, IgA, IgG-N та IgG-S у різні періоди інфекційного процесу

Результати дослідження значень IgM до SARS-CoV-2 залежно від тяжкості перебігу показали, що у більшості госпіталізованих дітей значення IgM при різних ступенях тяжкості хвороби виявлялись позитивними з першого до сьомого дня хвороби. У дітей з тяжким перебігом SARS-CoV-2 середнє значення IgM у сироватці крові у цей період становило 1,39 [1,36; 4,07] (min-0,11, max-14,63). Водночас цей показник у дітей з середньо-тяжким перебігом був нижчим референтних значень і суттєво нижчим за показник при тяжкій формі хвороби ($p < 0,05$) та становив 0,22 [0,14; 0,58] (min-0,03, max-8,49).

Аналізуючи результати досліджень IgM до SARS-CoV-2 з 8 по 14 день хвороби виявлено відмінності: негативні середні значення при середньо-тяжкому перебігу COVID-19 – 0,41 [0,27; 2,73] (min-0,073, max-12,66) та позитивні – 2,77 [0,36; 3,23] (min-0,073, max-6,79) – при тяжкому ($p > 0,05$).

Така ж тенденція спостерігається в період з третього по четвертий тиждень від початку стаціонарного лікування в учасників нашого дослідження з тяжким перебігом захворювання: середнє значення IgM до SARS-CoV-2 становить 4,42 [2,08; 6,38].

Через 3 місяці після перенесеного COVID-19 середні значення показників IgM до SARS-CoV-2 виявились негативними і становили 0,09 [0,05; 0,09] (min-0,01, max-0,16) при середньо-тяжкому перебігу та 0,02 [0,02; 0,04] (min-0,02, max-0,37) – при тяжкому ($p > 0,05$).

Дослідження рівнів IgA до SARS-CoV-2 у група різної тяжкості перебігу захворювання у дітей показало, що середні значення цього імуноглобуліну на першому тижні хвороби у пацієнтів як із середньо-тяжким, так і з тяжким перебігом хвороби були нижчі від референтних значень і становили 0,11 [0,09; 0,17] (min-0,05, max-3,93); 0,33 [0,28; 0,36] (min-0,09, max-0,52) відповідно. Середнє значення імуноглобулінів цього класу з 15 по 30 день після появи перших клінічних ознак у пацієнтів з тяжким перебігом хвороби становило 1,48 [0,52; 1,82] (min-0,38, max-6,35), а середнє його значення в цей період у пацієнтів зі середньо-тяжкою формою захворювання було нижчим від референтних значень ($p < 0,05$) і становило 0,24 [0,16; 0,30] (min-0,13, max-0,33). З другого місяця та до 90 дня від початку клінічних проявів у пацієнтів обох груп рівень IgA до SARS-CoV-2 теж був негативним.

У наших дослідженнях ми виявили, що у дітей віком від 10 до 18 років середнє значення IgA до SARS-CoV-2 в терміні з 15 по 30 дні становило 0,93 [0,33; 1,74] (min-0,26, max-6,35). Водночас у дітей віком 5 до 10 років середнє значення IgA до SARS-CoV-2 склало 0,22 [0,14; 0,33] (min-0,13, max-0,52) ($p > 0,05$).

При дослідженні IgG-N до SARS-CoV-2 відповідно до тяжкості перебігу COVID-19 виявлено, що середні значення IgG-N до SARS-CoV-2 у пацієнтів з тяжкою формою COVID-19 наростали з 2,34 [0,33; 3,41] (min-0,11, max-4,92) з другого тижня до 5,50 [3,51; 7,40] (min-1,52, max-9,30) до трьох місяців.

У пацієнтів з середньо-тяжким перебігом хвороби середнє значення IgG-N до SARS-CoV-2 з 31 до 90 дня було найвищим і становило 5,85 [3,19; 8,59] (min-0,88, max-10,11). Значущою різниця між показниками IgG-N до SARS-CoV-2 при середньо-тяжкому та тяжкому перебігу COVID-19 була лише в періоді з 15 по 30 день захворювання: 0,54 [0,21; 1,89] проти 5,55 [4,99; 5,80], відповідно ($p < 0,05$).

У пацієнтів як із середньо-тяжкими так і з тяжким перебігом хвороби, середні значення IgG-N до SARS-CoV-2 в усі періоди дослідження були позитивними та через три місяці від початку хвороби становили: 1,51 [0,59; 3,44] (min-0,12, max-6,06) та 1,46 [0,47; 5,04] (min-0,19, max-12,21) відповідно ($p > 0,05$) (рис. 3.6).

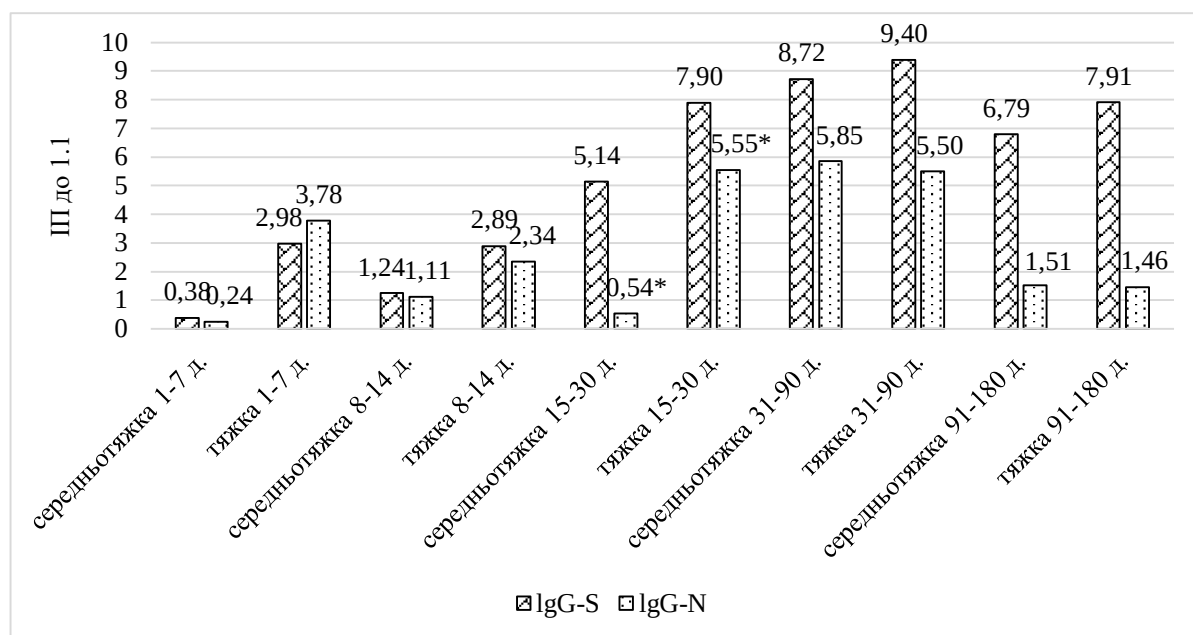


Рисунок 3.6. Серединні значення IgG-S та IgG-N до SARS-CoV-2 у різні періоди інфекційного процесу з урахуванням тяжкості перебігу хвороби

Примітка. * – різниця достовірна між середньо-тяжким та тяжким перебігом хвороби щодо IgG-N ($p < 0,05$).

При тяжких формах хвороби IgG-N до SARS-CoV-2 з'являються швидко та на першому тижні хвороби є вищими, ніж IgG-S SARS-CoV-2. Обидва імуноглобуліни виявляються позитивними в терміні дослідження до шести місяців, при виключенні можливості вторинного інфікування.

За результатами наших досліджень IgG-S SARS-CoV-2 відповідно до тяжкості перебігу COVID-19 виявлено, що у дітей з цією недугою як при тяжких, так і при середньо-тяжких її формах, спостерігалось постійне зростання його серединного значення до трьох місяців дослідного періоду. Однак, найвище серединне значення 9,40 [7,80; 10,60] (min-6,20, max-11,80) IgG-S до SARS-CoV-2 виявлено у пацієнтів з тяжкою формою хвороби в період з 31 до 90 дня дослідження, тоді як у дітей із середньо-тяжкою формою цей показник був на рівні 8,72 [8,64; 8,97] (min-0,18, max-9,32). При тяжких формах хвороби у період дослідження від трьох місяців до шести місяців серединне значення IgG-S до SARS-CoV-2 становило 7,91 [7,90; 8,97] (min-6,98, max-9,88) і було незначно вищим ($p > 0,05$), ніж у пацієнтів зі середньо-тяжким перебігом хвороби – 6,79 [6,11; 8,49] (min-0,88, max-9,15) у цей же період (рис. 3.6).

Аналіз розподілу за віком рівнів IgG-N та IgG-S до S SARS-CoV-2 показав, що найвищі показники серединного значення обох імуноглобулінів були виявлені у дітей віком від 10 до 18 років з 31 по 90 день: 9,32 [7,76; 10,56] (min-6,20, max-11,80) IgG-S та 5,85 [4,98; 9,30] (min-1,52, max-10,11) IgG-N до SARS-CoV-2. Дослідження рівнів IgG-N та IgG-S показали тривалу наявність їх у пацієнтів різних вікових груп з різним перебігом хвороби. Так, у терміні з 91 по 180 днів у дітей віком від одного до п'яти років серединне значення IgG-S становило 8,53 [7,81; 9,01] (min-6,98, max-9,14), IgG-N – 1,56 [1,01; 4,32] (min-0,20, max-6,06); у дітей 5-9 років відповідно 7,08 [6,20; 8,31] (min-5,91, max-9,14) та 2,97 [1,24; 4,29] (min-0,59, max-6,06); у дітей 10-17 років 7,73 [6,57; 8,51] (min-0,88, max-9,88) та 1,21 [0,47; 4,51] (min-0,12, max-12,21) відповідно (рис. 3.7).

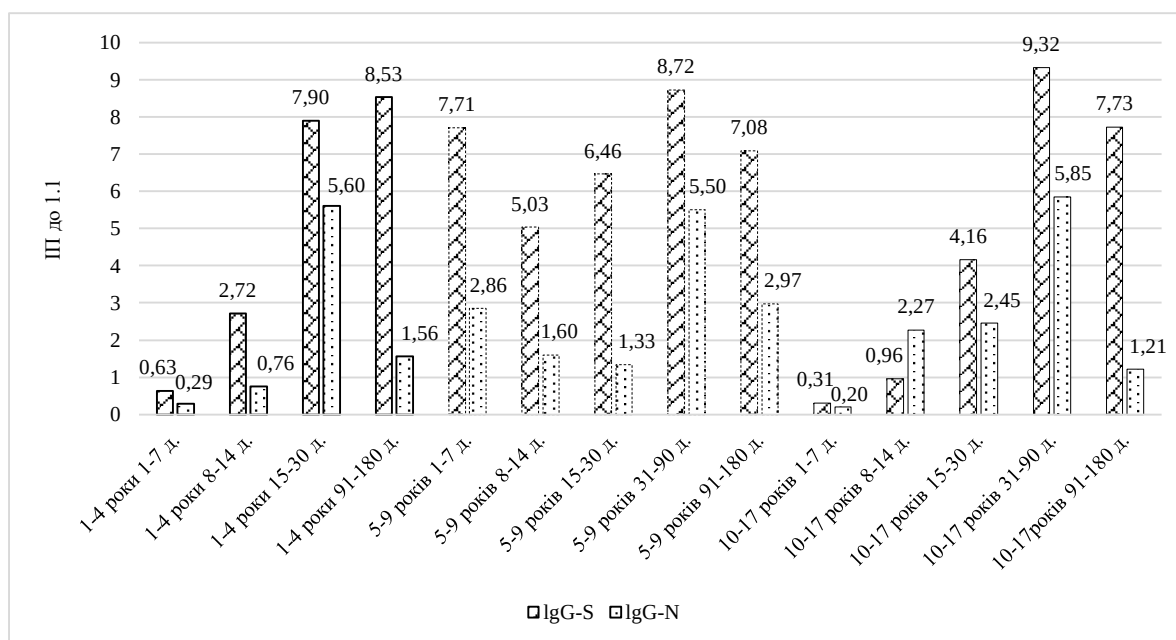


Рисунок 3.7. Серединні значення IgG-S та IgG-N до SARS-CoV-2 у різні періоди інфекційного процесу у дітей трьох вікових груп

3.6. Кореляційні взаємозв'язки показників крові відповідно до віку та тяжкості перебігу хвороби

При дослідженні кількості лейкоцитів загального аналізу крові проведеного пацієнтам з COVID-19 на момент поступлення до лікарні та на третю добу лікування виявлено середньої сили прямий кореляційний зв'язок між даними показниками ($r = +0,68$; $p < 0,05$). Також виявлено середньої сили прямий кореляційний зв'язок між кількістю лейкоцитів у крові пацієнтів при госпіталізації та кількістю нейтрофільних гранулоцитів на третій день перебування пацієнтів у стаціонарі ($r = +0,50$; $p < 0,05$). У дослідженні виявлений середньої сили прямий кореляційний зв'язок між кількістю лейкоцитів та кількістю тромбоцитів у день поступлення ($r = +0,36$; $p < 0,05$), але слабкий зв'язок між кількістю лейкоцитів на початку лікування та кількістю тромбоцитів при його завершенні ($r = +0,22$; $p < 0,05$).

Ми вивчали кореляційні зв'язки між рівнями різних класів імуноглобулінів, дослідження яких проводилися у терміни: Ig1 – з першого по сьомий день; Ig2 – з восьмого по 14 день та Ig3 – з 15 по 30 день. Аналіз кореляційних зв'язків між рівнями сироваткових IgA1 та IgM1; IgA1 та IgA2 показали середньої сили прямий кореляційний зв'язок ($r = +0,48$; $p < 0,0001$) та функціональний прямий кореляційний зв'язок ($r = +1,00$; $p < 0,0001$), відповідно.

Також виявлено середньої сили прямий кореляційний зв'язок між рівнями IgA1 та IgG1 ($r = +0,61$; $p < 0,0001$), який вказує, що при збільшенні рівня IgA1 нарастають і рівні IgG1 (рис. 3.8). Виявлено статистично значущий прямий кореляційний зв'язок середньої сили між рівнем IgA1 та IgG2 ($r = +0,34$; $p < 0,05$). Проте, між рівнем IgG1 та IgA2 настає функціональний обернений кореляційний зв'язок ($r = -1,000$; $p < 0,0001$).

Ми дослідили, що специфічні IgM та IgG з'являються у пацієнтів вже на першому тижні хвороби. Встановлено середньої сили позитивний кореляційний зв'язок між рівнем IgM та IgG до SARS-CoV-2 на момент госпіталізації ($r = +0,32$; $p < 0,01$).

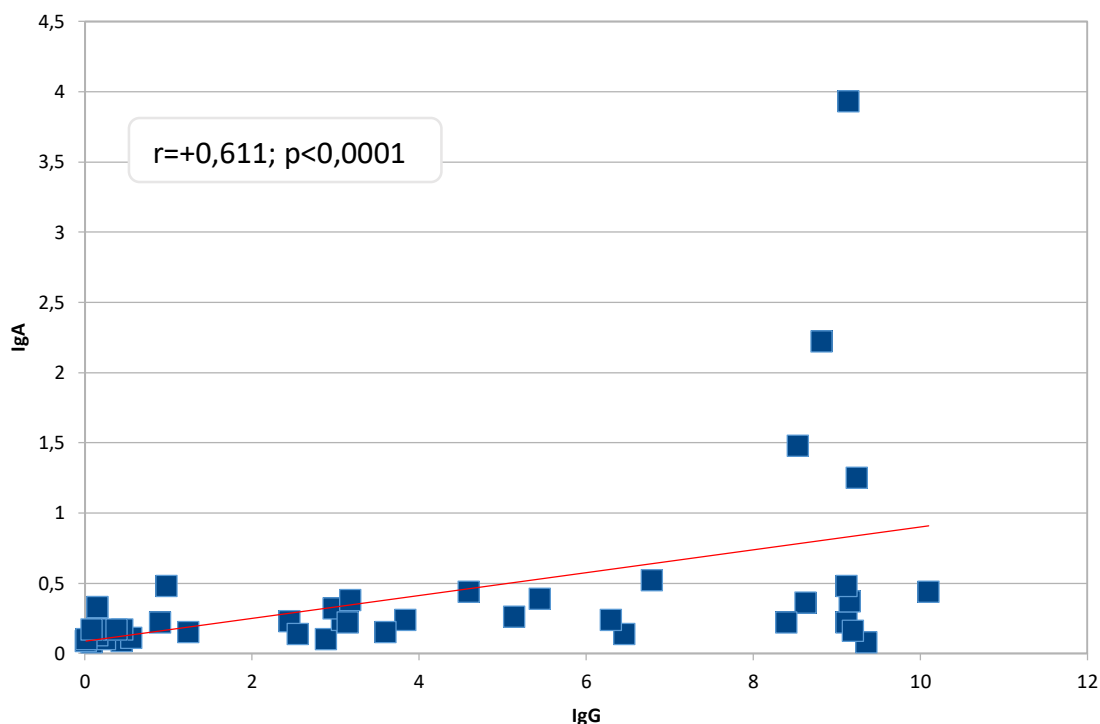


Рисунок 3.8. Кореляційний зв'язок між показниками IgA та IgG до SARS-CoV-2 при госпіталізації у пацієнтів з COVID-19

У результаті нашого дослідження було виявлено декілька важливих взаємозв'язків між імунологічними та біохімічними показниками у дітей, хворих на COVID-19. Зокрема, було зафіксовано прямий кореляційний зв'язок середньої сили між рівнями IgA1 та Д-димером при госпіталізації ($r = +0,38$; $p < 0,010$). Також були виявлені прямі кореляційні зв'язки в межах середньої сили між рівнями IgA1 та феритину ($r = +0,38$; $p < 0,05$), а також між рівнями IgA1 та фібриногеном на початку лікування ($r = +0,39$; $p < 0,05$). Варто відзначити, що кореляційний зв'язок між показниками IgA1 та фібриногеном посилювався у динаміці і досягав високого ступеня ($r = +0,81$; $p < 0,05$).

У дослідженні було виявлено прямий кореляційний зв'язок середньої сили між рівнями СРП 1 (при поступленні) та СРП 2 (на третю добу лікування), а також сильний прямий зв'язок між СРП 1 та СРП 3 (на шостий день лікування): ($r = +0,36$; $p < 0,05$) та ($r = +0,75$; $p < 0,05$) відповідно. Між рівнями СРП 1 та фібриногеном на момент госпіталізації також було виявлено прямий кореляційний зв'язок середньої сили ($r = +0,34$; $p < 0,05$). Також встановлено позитивний кореляційний зв'язок середньої сили між рівнями феритину та СРП 1 ($r = +0,38$; $p < 0,05$).

Вивчаючи динаміку рівня прокальцитоніну 1 (на початку лікування) та прокальцитоніну 2 (на третій день), встановлено середньої сили прямий позитивний кореляційний зв'язок ($r = +0,63$; $p < 0,05$). При збільшенні рівня прокальцитоніну 1 спостерігається зниження кількості тромбоцитів та рівня загального білка, що підтверджено середньої сили зворотніми кореляційними зв'язками ($r = -0,49$; $p < 0,05$) та ($r = -0,47$; $p < 0,05$), відповідно.

Виявлено середньої сили позитивний кореляційний зв'язок між рівнем Д-димеру та феритину ($r = +0,47$; $p < 0,0004$). Схожий позитивний зв'язок середньої сили ($r = +0,49$; $p < 0,05$) спостерігався між рівнями Д-димеру та прокальцитоніну при госпіталізації. Виявлено також прямий середньої сили зв'язок між рівнем Д-димеру та запальними маркерами ШОЕ та СРП: ($r = +0,35$; $p < 0,05$) та ($r = +0,33$; $p < 0,05$), відповідно.

Аналізуючи кореляційні зв'язки між тяжкістю захворювання та лабораторними показниками, ми виявили такі залежності. Статистично достовірним є прямий середньої сили зв'язок між тяжкістю хвороби та рівнем IgA1 ($r = +0,32$; $p < 0,05$). Також рівень IgA2 демонструє сильний прямий зв'язок із тяжкістю захворювання ($r = +0,79$; $p < 0,05$), що є свідченням зростання досліджуваних показників при тяжкому перебігу хвороби. Прямими середньої сили кореляційними зв'язками: IgM1 ($r = +0,310$; $p < 0,0054$), IgM2 ($r = +0,143$; $p > 0,05$) та IgG2 до S-білка ($r = +0,303$; $p < 0,05$).

Виявлено сильний обернений взаємозв'язок між значенням ПІ на третій день лікування із тяжкістю захворювання ($r = -0,71$; $p < 0,05$), що демонструє зниження рівня ПІ у динаміці при тяжкому перебігу захворювання.

Тяжкість захворювання виявилася обернено пов'язаною з низькою кількістю еритроцитів при госпіталізації ($r = -0,20$; $p < 0,05$).

Прямий кореляційний зв'язок середньої сили виявлено між тяжкістю захворювання та лабораторними показниками: прокальцитоніном ($r = +0,51$; $p < 0,05$), IgM1 ($r = +0,31$; $p < 0,05$), Д-димером при госпіталізації ($r = +0,35$; $p < 0,05$) та кількістю лейкоцитів на третій день госпіталізації ($r = +0,44$; $p < 0,05$).

На третю добу лікування, виявлено значну зворотню залежність між тяжкістю хвороби та рівнем загального білка ($r = -0,71$; $p < 0,05$). Одночасно встановлено пряму залежність між тяжкістю перебігу захворювання та вмістом альбуміну ($r = +0,37$; $p > 0,05$). Крім того, виявлено, що вміст альбуміну, визначений на третій день госпіталізації, зменшується зі зростанням рівня прокальцитоніну ($r = -1,00$; $p < 0,0001$).

Важливо відзначити, що між рівнем СРП при госпіталізації та тяжкістю хвороби ми виявили слабкий прямий кореляційний зв'язок ($r = +0,29$; $p < 0,05$).

Не було виявлено статистично значущих взаємозв'язків між тяжкістю перебігу хвороби та рівнем IgG-S1 ($r = +0,10$; $p > 0,05$), IgG-S2 ($r = +0,30$; $p > 0,05$), а також кількістю тромбоцитів, рівнями тропоніну I, феритину та IL-6 при госпіталізації – ($r = -0,30$; $p < 0,05$), ($r = +0,36$; $p > 0,05$), ($r = +0,25$; $p > 0,05$) та ($r = +0,25$; $p > 0,05$), відповідно.

Додатково, встановлено значущий позитивний зв'язок між тяжкістю перебігу хвороби та тромбіновим часом при госпіталізації ($r = +0,86$; $p > 0,05$). З іншого боку, не виявлено статистично значущих кореляцій між тяжкістю та рівнем фібриногену на момент поступлення у стаціонар ($r = +0,24$; $p > 0,05$), (табл. 3.6).

Виявлено позитивний кореляційний зв'язок слабкої сили між віком дитини та тяжкістю перебігу захворювання ($r = +0,22$; $p < 0,05$).

У дітей з COVID-19 встановлено, що у дітей старшого віку спостерігається зниження кількості тромбоцитів на момент госпіталізації, що підтверджено негативним кореляційним зв'язком середньої сили ($r = -0,30$; $p < 0,002$).

Кореляційні взаємозв'язки лабораторних показників залежали від віку пацієнтів. Рівень сироваткових IgM1 демонструє прямий середньої сили зв'язок з віком пацієнтів ($r = +0,31$; $p < 0,05$). Це свідчить, що чим старша дитина, тим вищий рівень IgM1. Також встановлений позитивний зв'язок між віком дитини та рівнем IgA 2 ($r = +0,57$; $p > 0,05$).

Таблиця 3.6

Кореляційні зв'язки (R) лабораторних показників з тяжкістю захворювання

Тяжкість COVID-19	Показники	R
	IgA1	0,32*
	IgA2	0,79*
	IgM1	0,31*
	Д-димер 1	0,35*
	прокальцитонін 1	0,51*
	ПІ 2	-0,71*
	загальний білок 2	-0,71*
	лейкоцити 2	0,44*
	вік (роки)	0,224*

Примітка. * – кореляційний зв'язок достовірний ($p < 0,05$)**3.7. Прогноз тяжкого перебігу SARS-CoV-2 у дітей: логістична регресійна модель**

З-поміж аналізованих даних, за допомогою методу логістичної регресії, ми виокремили 8 факторів, які при поєднаній дії мають вірогідний вплив на розвиток тяжкого перебігу COVID-19 у госпіталізованих дітей. Фактори та їх коефіцієнти регресії наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Коефіцієнти регресії факторів, які при поєднаній дії впливають на розвиток тяжкого перебігу COVID-19 у госпіталізованих дітей

№ з/п	Фактори	Умовне позначення	Коефіцієнти регресії (β_i)
1.	Гарячка на момент госпіталізації	X2	0,087
2.	Кашель	X3	-0,137
3.	Задишка	X5	0,858
4.	SpO2 % при госпіталізації (кімнатне повітря)	X4	-0,201
5.	Діарея	X1	0,053
6.	Кількість лейкоцитів на момент госпіталізації ($\times 10^9/\text{л}$)	X7	0,044
7.	Рівень СРП на момент госпіталізації (нг/мл)	X8	0,011
8.	Рівень IgM при госпіталізації (індекс позитивності 1,1)	X6	0,003
	Константа		17,282

З-поміж них три фактори (діарея, кашель та задишка) мають бінарний варіант відповіді: 0 – немає, 1 – наявний/а. Показник сатурації, рівень IgM до SARS-CoV-2, кількість лейкоцитів крові та рівень СРП наводяться у кількісному їхньому значенні на момент поступлення. Щодо температури на момент госпіталізації використано наступне кодування: 6 – відповідає температурі від 36,2 до 37,0 °C; 7 – від 37,1 до 38,0 °C; 8 – від 38,1 до 39,0 °C; 9 – від 39,1 до 40,1 °C; 10 – $>40,1$ °C;

Два фактори з восьми зазначених мають зворотний зв'язок з розвитком тяжкого перебігу COVID-19 у госпіталізованих дітей: кашель та рівень сатурації. Тобто при меншому відсотковому значенні сатурації та при відсутності кашлю зростає ризик даного перебігу. Натомість інші шість факторів мають провокуючий вплив: при їх наявності чи зростанні абсолютного значення зростає ризик тяжкого перебігу хвороби у госпіталізованих дітей.

Достовірність обчислених коефіцієнтів перевірено за допомогою методу Вальда, а цілої моделі – за допомогою ксі-квадрату, значення якого становить 128,9 та вказує на те, що модель є достовірною з вірогідністю помилки менше 0,1 % ($p < 0,001$).

Підставивши у формулу (2.1) результати, отримані за методом логістичної регресії, було отримано рівняння для визначення С, що є першим статистичним етапом при прогнозуванні вірогідності тяжкого перебігу COVID-19 у госпіталізованих дітей:

$$C = 0,053 \cdot X_1 + 0,087 \cdot X_2 - 0,137 \cdot X_3 - 0,201 \cdot X_4 + 0,858 \cdot X_5 + 0,003 \cdot X_6 + 0,044 \cdot X_7 + 0,011 \cdot X_8 + 17,282$$

Розраховане значення С для кожної дитини на другому етапі підставляється у рівняння 2.2. Отримане значення R вказує на вірогідність тяжкого перебігу COVID-19 у конкретної дитини: результат до 50 % вказує на низький ризик тяжкого перебігу, натомість 50 % та вище вказує на високий ризик тяжкого перебігу.

Для кращого розуміння функціонування запропонованої моделі наводимо клінічний *приклад №1*. Дитина N.

Відомо, що у неї не було діареї (код 0), температура до госпіталізації становила 38,6°C (код 8), був кашель (код 1), сатурація становила 97 %, задишки не було (код 0), рівень IgM до SARS-CoV-2 на момент госпіталізації становили 0,11; кількість лейкоцитів крові – $5,8 \times 10^9/\text{л}$; рівень СРП – 12 мг/л. Підставивши ці дані у формули 2.1 та 2.2 отримаємо:

$$C = 0,053 \cdot 0 + 0,087 \cdot 8 - 0,137 \cdot 1 - 0,201 \cdot 97 + 0,858 \cdot 0 + 0,003 \cdot 0,11 + 0,044 \cdot 5,8 + 0,011 \cdot 12 + 17,282 = -1,27$$

$$R = \frac{1}{1 + e^{1,27}} \cdot 100\% = 21,93\%$$

Тобто, виходячи з проведених розрахунків, у цієї дитини є низька вірогідність тяжкого перебігу COVID-19, оскільки отримане значення R є менше 50 %. Подальше спостереження показало, що у цієї дитини спостерігався середньо-тяжкий перебіг хвороби, тобто наш прогноз справдився.

Клінічний приклад №2. Дитина №2.

Відомо, що у неї була діарея (код 1), температура до госпіталізації становила 39,3°C (код 9), турбував кашель (код 1), сатурація становила 93 %, спостерігалась задишка (код 1), рівень IgM до SARS-CoV-2 на момент госпіталізації становили 0,11 (індекс позитивності 1,1); кількість лейкоцитів крові $4,41 \times 10^9/\text{л}$; рівень СРП – 12 мг/л. Підставивши ці дані в формули 2.1 та 2.2 отримаємо:

$$C = 0,053 \cdot 1 + 0,087 \cdot 9 - 0,137 \cdot 1 - 0,201 \cdot 93 + 0,858 \cdot 1 + 0,003 \cdot 0,11 + 0,044 \cdot 4,41 + 0,011 \cdot 12 + 17,282 = 0,47$$

$$R = \frac{1}{1 + e^{-0,47}} \cdot 100\% = 61,54\%$$

Тобто, виходячи з проведених розрахунків, у цієї дитини є високий ризик тяжкого перебігу COVID-19, оскільки отримане значення R є більшим 50 %. Подальше спостереження показало, що у цієї дитини був тяжкий перебіг, тобто наш прогноз справдився.

На основі ретроспективної бази даних пацієнтів, нами було проаналізовано основні діагностичні параметри опрацьованої прогностичної моделі. Загальна точність становила 98,18 %, при високій чутливості (96,67 %) та специфічності (98,75 %).

3.8. Результати рентгенологічної діагностики

У досліджуваній групі пацієнтів з COVID-19 91 (82,73 %) особі проведено рентгенологічне дослідження легень. У третини пацієнтів – 33,0 % (95%ДІ: 23,9-43,1 %) виявлено посилений легеневий малюнок. Серед усіх пацієнтів пневмонію діагностовано у 46 осіб (41,82 %). Правобічну вогнищеву пневмонію діагностовано у 17 пацієнтів – 18,7 % (95%ДІ: 11,6-27,6 %). Ураження правої легені складало найбільшу частку з усіх обстежених пацієнтів. Лівобічну вогнищеву пневмонію діагностовано у шести осіб – 6,6 % (95%ДІ: 2,7-13,0 %). Нижньочасточкову лівобічну пневмонію виявлено у чотирьох пацієнтів – 4,4 % (95%ДІ: 1,4-10,1 %). Двобічні пневмонії: вогнищеві та полісегментарні діагностовано у трьох – 3,3 % (95%ДІ: 0,8-8,5 %) та у п'яти – 5,5 % (95%ДІ: 2,0-11,6 %) пацієнтів, відповідно. Тимомегалія діагностована лише у шести пацієнтів – 6,6 % (95%ДІ: 92,7-13,0 %) зі середньо-тяжким перебігом COVID-19. У пацієнтів з середньо-тяжким перебігом COVID-19 при рентгенологічному дослідженні превалювали: посилений легеневий малюнок у 24 – 38,1 % (95%ДІ: 26,7-50,5 %); правобічна вогнищеву пневмонія у 12 – 19,0 % (95%ДІ: 10,7-30,0 %).

Усім пацієнтам з тяжким перебігом SARS-CoV-2 інфекції проведена діагностика ураження легень: рентгенографія – 28 пацієнтам, комп'ютерна томографія – двом. Дев'ятнадцяти пацієнтам з тяжким SARS-CoV-2 діагностовано пневмонію. Як виявилось, правобічна вогнищеву і двобічна полісегментарна пневмонії діагностовані у рівній кількості пацієнтів – у п'яти осіб – 17,9 % (95%ДІ: 6,7-34,9 %). Двобічна вогнищеву, лівобічна вогнищеву та лівобічна нижньочасточкова пневмонії діагностовані у трьох – 10,7 % (95%ДІ: 2,7-26,0 %), у трьох – 10,7 % (95%ДІ: 2,7-26,0 %) та однієї особи – 3,6 % (95%ДІ: 0,1-15,6 %), відповідно. Плеврит виявлено у двох – 2,2 % (95%ДІ: 0,3-6,8 %) пацієнтів. Рентгенологічні зміни виявлені у пацієнтів різних вікових груп з SARS-CoV-2 наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Рентгенологічні ознаки ураження легень у пацієнтів з COVID-19 залежно від віку наведено у відсотках та 95% ДІ

Рентгенологічні ознаки	Вік (роки)		
	≥1 <5	≥5 <10	≥10 <18
Інтерстиціальна пневмонія	0,0 (0,0-11,5)	7,4 (1,2-21,8)	14,0 (5,8-26,5)
Правобічна вогнищеву пневмонія	19,0 (6,2-39,4)	22,2 (9,4-40,4)	16,3 (7,3-29,4)
Правобічна нижньочасточкова пневмонія	0,0 (0,0-11,5)	0,0 (0,0-9,0)	0,0 (0,0-5,8)
Лівобічна вогнищеву пневмонія	0,0 (0,0-11,5)	7,4 (1,2-21,8)	9,3 (2,9-20,6)
Лівобічна нижньодолева пневмонія	0,0 (0,0-11,5)	3,7 (0,1-16,1)	7,0 (1,7-17,4)
Двобічна вогнищеву пневмонія	9,5 (1,5-27,4)	3,7 (0,1-16,1)	0,0 (0,0-5,8)
Двобічна полісегментарна пневмонія	9,5 (1,5-27,4)	3,7 (0,1-16,1)	4,7 (0,7-14,1)
Двобічна нижньочасточкова пневмонія	0,0 (0,0-11,5)	0,0 (0,0-9,0)	0,0 (0,0-5,8)
Ателектаз зліва у верхній долі	0,0 (0,0-11,5)	0,0 (0,0-9,0)	0,0 (0,0-5,8)
Правобічний плеврит	0,0 (0,0-11,5)	0,0 (0,0-9,0)	4,7 (0,7-14,1)
Правобічна пневмонія верхньої та середньої долі	0,0 (0,0-11,5)	3,7 (0,1-16,1)	0,0 (0,0-5,8)
Правобічний пневмоторакс	4,8 (0,2-20,4)	0,0 (0,0-9,0)	0,0 (0,0-5,8)

3.9 Модель логістичної регресії для прогнозування ризику розвитку пневмонії у дітей з COVID-19

З-поміж аналізованих даних, за допомогою методу логістичної регресії, було виокремлено 9 факторів, які при поєднаній дії мають вірогідний вплив на розвиток пневмонії спричиненої SARS-CoV-2 у госпіталізованих дітей. Фактори та їх коефіцієнти регресії наведено у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9

Коефіцієнти регресії факторів, які при поєднаній дії впливають на розвиток коронавірусної пневмонії у госпіталізованих дітей

№ з/п	Фактори	Умове позначення	Коефіцієнти регресії (β_i)
1.	Вік (роки)	X1	0,070
2.	Гарячка на момент госпіталізації	X2	0,021
3.	Кашель	X3	1,273
4.	Задишка	X4	2,286
5.	Кількість лейкоцитів на момент госпіталізації ($\times 10^9/\text{л}$)	X7	-0,130
6.	Кількість тромбоцитів на момент госпіталізації ($\times 10^9/\text{л}$)	X8	-0,0027
7.	Рівень СРП на момент госпіталізації (N6 мг/л)	X9	0,018
8.	Рівень IgA при госпіталізації (індекс позитивності 1,1)	X5	1,368
9.	Рівень IgM при госпіталізації (індекс позитивності 1,1)	X6	0,286
	Константа		-1,426

З-поміж них два фактори (кашель та задишка) мають бінарний варіант відповіді: 0 – немає, 1 – наявний/а. Рівні IgA, IgM до SARS-CoV-2, кількість лейкоцитів та тромбоцитів крові, рівень СРП наводяться у кількісному їхньому значенні на момент поступлення. Вік теж наводиться у кількісному значенні, з округленням до десятих. Щодо температури на момент госпіталізації використано наступне кодування: 6 – відповідає температурі від 36,2 до 37,0 °C; 7 – від 37,1 до 38,0 °C; 8 – від 38,1 до 39,0 °C; 9 – від 39,1 до 40,1 °C; 10 – >40,1 °C.

Два фактори з дев'яти зазначених мають зворотний зв'язок з розвитком пневмонії, спричиненої SARS-CoV-2 у госпіталізованих дітей: рівні лейкоцитів та тромбоцитів. Тобто при лейкопенії та тромбоцитопенії зростає ризик даної нозології. Натомість інші сім факторів мають провокуючий вплив: при їхній наявності чи збільшенні абсолютного значення зростає ризик пневмонії у госпіталізованих дітей.

Достовірність обчислених коефіцієнтів перевірено за допомогою методу Вальда, а цілої моделі – за допомогою ксі-квадрату, значення якого становить 45,1 та вказує на те, що модель є достовірною з вірогідністю помилки менше 0,1 % ($p < 0,001$).

Підставивши у формулу (2.1) результати, отримані за методом логістичної регресії, нами було отримано рівняння для визначення С, що є першим статистичним етапом при прогнозуванні вірогідності SARS-CoV-2 асоційованої пневмонії у госпіталізованих дітей:

$$C = 0,070 \cdot X1 + 0,021 \cdot X2 + 1,273 \cdot X3 + 2,286 \cdot X4 + 1,368 \cdot X5 + 0,286 \cdot X6 - 0,130 \cdot X7 - 0,0027 \cdot X8 + 0,018 \cdot X9 - 1,426$$

Розраховане значення С для кожної дитини на другому етапі підставляється у рівняння 2.2. Отримане значення R вказує на вірогідність SARS-CoV-2 асоційованої пневмонії у конкретної дитини: результат до 50 % вказує на низький ризик пневмонії, натомість 50 % та вище вказує на її високий ризик розвитку.

Для кращого розуміння функціонування запропонованої прогностичної моделі наводимо клінічний **приклад №1**, дитина N 3.

Вік дитини один рік. Відомо, що у неї температура на момент госпіталізації становила 39,7 °С (код 9), не було кашлю (код 0) та задишки (код 0), на перший день рівень IgA становив 0,22 (індекс позитивності 1,1); IgM – 0,39 (індекс позитивності 1,1); кількість лейкоцитів крові – $4,1 \times 10^9/\text{л}$; тромбоцитів – $197 \times 10^9/\text{л}$, а рівень СРП – 6 мг/л. Підставивши ці дані у формули 2.1 та 2.2 отримаємо:

$$C = 0,070*1 + 0,021*9 + 1,273*0 + 2,286*0 + 1,368*0,22 + 0,286*0,39 - \\ -0,130*4,1 - 0,0027*197 + 0,018*6 - 1,426 = -1,71$$

$$R = \frac{1}{1+e^{1,71}} * 100\% = 15,32\%$$

Тобто, виходячи з проведених розрахунків, у цієї дитини є низька вірогідність коронавірусної пневмонії, оскільки отримане значення R є менше 50%. Подальше спостереження показало, що у цієї дитини пневмонія не розвинулась, тобто наш прогноз справдився.

Клінічний приклад №2, дитина №4.

Вік дитини 16 років. Відомо, що у неї температура на момент госпіталізації становила 40,2 °С (код 10), був кашель (код 1) та задишка (код 1), на перший день рівень IgA становив 0,23 (індекс позитивності 1,1); IgM – 0,40 (індекс позитивності 1,1); кількість лейкоцитів крові – $3,9 \times 10^9/\text{л}$; тромбоцитів – $344 \times 10^9/\text{л}$, а рівень СРП – 12 мг/л. Підставивши ці дані в формули 2.1 та 2.2 отримаємо:

$$C = 0,070*16 + 0,021*10 + 1,273*1 + 2,286*1 + 1,368*0,23 + 0,286*0,40 - \\ -0,130*3,9 - 0,0027*344 + 0,018*12 - 1,426 = 2,67$$

$$R = \frac{1}{1+e^{-2,67}} * 100\% = 93,52\%$$

Тобто, виходячи з проведених розрахунків, у даної дитини є високий ризик коронавірусної пневмонії, оскільки отримане значення R є більшим 50%. Подальше спостереження показало, що у даної дитини розвинулась SARS-CoV-2 асоційована пневмонія, тобто наш прогноз справдився.

На основі ретроспективної бази даних пацієнтів, нами було проаналізовано основні діагностичні параметри опрацьованої прогностичної моделі. Загальна точність становила 77,27%, при добрій чутливості (80,43 %) та специфічності (75,00 %).

ВИСНОВКИ

1. У пацієнтів з COVID-19 середня тривалість хвороби на догоспітальному етапі становила 4,00 дні [3,00; 7,00]. Провідними симптоми були: підвищена температура тіла (95,5 %), загальна слабкість (91,8 %), зниження апетиту (80,0 %), кашель (54,5 %), який частіше діагностувався при тяжкій формі COVID-19 (66,7 %) та превалював у пацієнтів віком від 10 до 18 років (63,2 %). Задишка турбувала усіх пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19: змішана – 70,0 % та експіраторна – 30,0 %, на відміну від пацієнтів з середньо-тяжкою формою – експіраторну задишку виявлено у 1,3 % ($p < 0,05$).

Проаналізувавши скарги з боку ШКТ у пацієнтів з COVID-19 третьої вікової групи, статистично достовірними є наявність діареї та болю у животі ($p < 0,05$).

Серединний вік дітей з тяжким COVID-19 становив 12,05 років [7.65; 16.00], з середньо-тяжким – 8,00 років [4.98; 13.08] ($p < 0,05$). Тяжкий перебіг COVID-19 розвинувся у 20 дітей (66,67 %) у віковій групі від 10 до 18 років.

2. При дослідженні показників загального аналізу крові у хворих на COVID-19 не виявлено статистичної достовірності між серединними значеннями кількості лейкоцитів у пацієнтів з різним за тяжкістю перебігу захворюванням. Проте в динаміці виявлено, що серединне значення цього показника було статистично вищим при тяжкому перебігу $8,30 \times 10^9/\text{л}$ [5,33; 14,75] у порівнянні із середньо-тяжким – $3,74 \times 10^9/\text{л}$ [2,51; 7,93] ($p < 0,05$). Найнижчим виявилось серединне значення кількості тромбоцитів $179,00 \times 10^9/\text{л}$ [153,00; 252,00] (min-52; max-385) у пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19 у віковій групі від 10 до 18 років ($p < 0,005$).

3. Статистично достовірними виявились результати серединних значень запальних маркерів у пацієнтів з середньо-тяжким та тяжким перебігом SARS-CoV-2: прокальцитоніну 0,05 нг/мл [0,03; 0,06] та 0,42 нг/мл [0,05; 1,34]; СРП 6,00 мг/л [4,00; 6,00] та 12,00 мг/л [6,00; 96,00]; IL-6 1,20 пг/мл [0,55; 2,15] та 7,50 пг/мл [0,65; 18,50]; IL-10 $1,87 \pm 6,37$ пг/мл та $22,64 \pm 60,97$ пг/мл, відповідно ($p < 0,05$). Найвищими виявились середні значення рівня IL-10 у пацієнті віком від 10 до 18 років.

4. Підвищені рівні Д-димеру корелювали з тяжкістю SARS-CoV-2 інфекції та наростали у динаміці. Серединні значення рівня Д-димеру на момент госпіталізації та в динаміці у дітей з тяжким перебігом COVID-19 становили: 791,00 нгФЕОд/мл [540,00; 1844,50], 1206,00 нгФЕОд/мл [980,00; 2855,00]; середньо-тяжким – 368,00 нгФЕОд/мл [149,25; 921,25], 425,00 нгФЕОд/мл [397,00; 812,50] ($p < 0,05$) та феритину: 195,00 нг/мл [49,75; 344,00], 232,10 нг/мл [73,20; 667,50], відповідно. Виявлено кореляційні зв'язки між рівнем Д-димеру з рівнями феритину ($r = +0,47$; $p < 0,0004$) та прокальцитоніну ($r = +0,49$; $p < 0,05$).

5. Рівні сироваткових IgM на першому тижні хвороби демонструють кореляційний зв'язок з віком пацієнтів ($r = +0,31$; $p < 0,05$). Найвище серединне значення рівня IgM до SARS-CoV-2 (4,42 [2,08; 6,38]) діагностовано у пацієнтів з тяжким перебігом до 30 дня від початку захворювання, знижуючись у динаміці та стає негативним після третього місяця. IgA до SARS-CoV-2 визначались позитивними з другого тижня у пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19. IgG-N та IgG-S до SARS-CoV-2 виявлено в усіх пацієнтів, з вищим серединним значенням IgG-S у пацієнтів з тяжкими формами хвороби у порівнянні з середньо-тяжкими. Серединне значення рівня IgG-S – 9,40 [7,80; 10,60] (min-6,20, max-11,80), було найвищим до трьох місяців постінфекційного періоду ($p < 0,05$). Знижуючись до 7,91 [7,90; 8,97] (min-6,98, max-9,88) до шести місяців після перенесеного захворювання. Підтверджено кореляційні зв'язки між рівнями IgA та IgG ($r = +0,61$; $p < 0,0001$) та між IgM з IgG на першому тижні хвороби ($r = +0,32$; $p < 0,01$).

6. Виявлено кореляційний зв'язок між віком дитини та тяжкістю перебігу COVID-19 ($r = +0,22$; $p < 0,05$). Значення рівнів прокальцитоніну ($r = +0,51$; $p < 0,05$), IgM ($r = +0,31$; $p < 0,05$) та Д-димеру ($r = +0,35$; $p < 0,05$), отриманих при госпіталізації, корелюють з тяжкістю хвороби. Тоді як рівні загального білка та альбуміну обернено пов'язані з тяжкістю SARS-CoV-2 лише з третього дня госпіталізації ($r = -0,71$; $p < 0,05$) та ($r = -1,00$; $p < 0,0001$).

7. Серед усіх пацієнтів з COVID-19 пневмонію діагностовано у 46 осіб (41,82 %). Правобічна вогнищева пневмонія виявлена у 18,7 % (95%ДІ: 11,6-27,6 %) і становила найбільшу частку. Пневмонія, асоційована з SARS-CoV-2 виявлена у 19 пацієнтів (63,33 %) з тяжким перебігом COVID-19. Плеврит виявлено у двох – 2,2 % (95%ДІ: 0,3-6,8 %) пацієнтів.

Оксигенотерапія через лицеву маску була застосована у 29 пацієнтів, з них у шести застосовано штучну вентиляцію легень. У двох дітей з критичною гіпоксемією, з неефективною ШВЛ з успіхом використано ЕКМО ($p < 0,05$).

8. Отримані результати логістичної регресії підтверджують важливість восьми факторів, які взаємодіючи мають значущий вплив на розвиток тяжкого перебігу COVID-19 у госпіталізованих дітей. Зокрема, діарея, кашель, задишка, рівень сатурації, температура на момент госпіталізації, кількість лейкоцитів, СРП та рівень IgM є важливими прогностичними показниками.

9. Також розроблено логістичну регресійну модель для передбачення розвитку пневмонії, спричиненої SARS-CoV-2, у госпіталізованих дітей. Дев'ять визначених факторів, включаючи вік, гарячку, кашель, задишку, рівні IgA та IgM до SARS-CoV-2, кількість лейкоцитів, тромбоцитів та рівень СРП, були ідентифіковані як ключові елементи для даного прогнозу. Досліджено два фактори, які демонструють зворотний зв'язок з розвитком пневмонії: рівні лейкоцитів та тромбоцитів. Інші сім мають провокуючий вплив, підвищуючи ризик розвитку пневмонії.

4. КЛІНІКО-ЛАБОРАТОРНІ ОСОБЛИВОСТІ МУЛЬТИСИСТЕМНОГО ЗАПАЛЬНОГО СИНДРОМУ, АСОЦІЙОВАНОГО З SARS-CoV-2

4.1. Синдроми МЗС асоційованим з SARS-CoV-2 у дітей

Високий рівень захворювання на SARS-CoV-2 у Львівській області призвів до появи запального синдрому з ураженням різних органів та систем – мультисистемний запальний синдром у дітей. МЗС характеризується поліморфізмом клінічних проявів.

У досліджуваній групі пацієнтів з МЗС асоційованим з SARS-CoV-2 було 33 особи. Середній вік пацієнтів становив 10,40 роки [7,00; 14,00].

МЗС розвинувся у 18 хлопців (54,5 %) та 15 дівчат (45,5 %), середній вік яких становив 10,25 років [7,00; 13,50]; 11,00 років [7,55; 13,70], відповідно. У двох дітей з ожирінням (6,06 %) та в однієї з білково-енергетичною недостатністю (3,03 %) діагностовано МЗС асоційований з SARS-CoV-2.

Серед пацієнтів з МЗС у 28 дітей РНК чи її фрагментів з мазків з носоглотки до SARS-CoV-2 не виявлено. Проте в п'яти ПЛР тест виявився позитивним.

Причиною госпіталізації дітей з МЗС зі середнім значенням на 7,00 день [6,00; 8,00] (при середньому значенні 6,79 день) були: фебрильна гарячка, зі середньою тривалістю до госпіталізації 6,00 днів [5,00; 7,00] (при середньому значенні 5,88 днів).

У пацієнтів з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 превалювала гіпертермія (39,1 - 40,1°C), яку діагностовано у 27 (81,8 %) пацієнтів; гіперпірексія (> 40,1°C) – у трьох (9,1 %) пацієнтів; фебрильна температура (38,1-39,0°C) – у двох (6,1 %) дітей. Тільки в одного пацієнта (3,0 %) була субфебрильна температура тіла (37,1 - 38,1°C), проте по найвищому його рівню (38,1°C).

У дітей з МЗС на другий день перебування у стаціонарі у більшості дітей – 21 (63,6 %) спостерігалась фебрильна гарячка; гіпертермія – у 10 пацієнтів (30,3 %); тільки у двох пацієнтів (6,1 %) визначалась субфебрильна гарячка (по вищій її границі). Нормальної температури тіла та гіперпірексії не спостерігалось у жодного пацієнта.

При МЗС гарячка була тривалою, на п'ятий день лікування майже у половини пацієнтів 14 (48,3 %) спостерігалась субфебрильна гарячка. Фебрильна гарячка турбувала 10 (34,5 %) пацієнтів. Гіпертермії та гіперпірексії не було в жодного пацієнта. У п'яти пацієнтів (17,2 %) температура тіла нормалізувалася (рис. 4.1). Середня тривалість підвищеної температури тіла при МЗС становила 10,00 днів [9,00; 11,00] (при середньому значенні 9,73 днів).

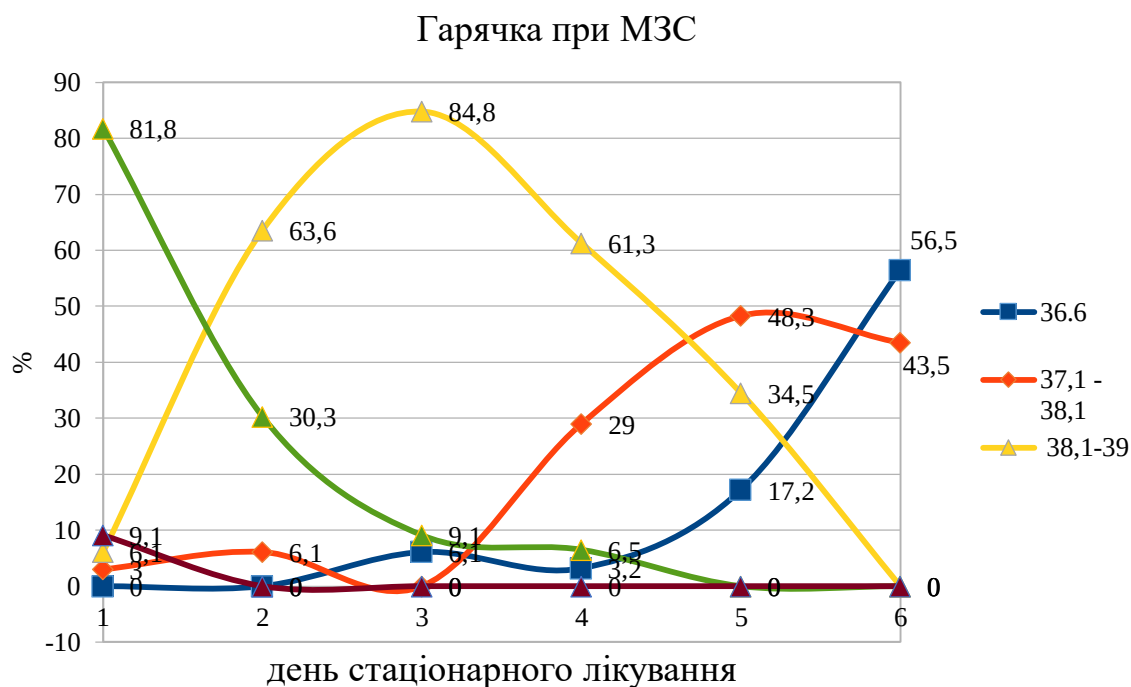


Рисунок 4.1. Динаміка гарячки у дітей з МЗС

Загальна слабкість спостерігалась у всіх пацієнтів з МЗС, їх часто турбував біль голови. Ця клінічна ознака виявлена у 24 (72,7 %) пацієнтів. Семеро дітей (21,2 %) були сонливими. Біль у суглобах діагностовано у трьох (9,1 %) пацієнтів. Диспепсичний синдром був однією з причин госпіталізації у дітей і проявлявся: відчуттям нудоти, одноразовим блюванням, водянистою діареєю від 1 до 3 разів на день, частим водянистим стільцем, наявністю крові у калі, болями у животі розлитого характеру та дискомфортом у навколупупкової ділянці (рис. 4.2).

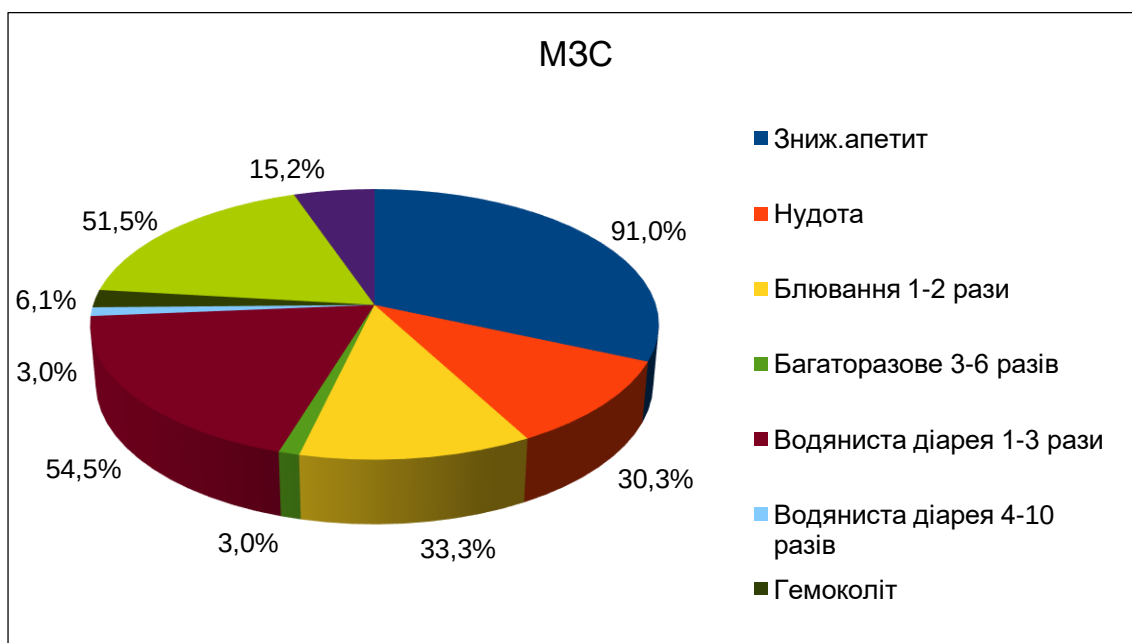


Рисунок 4.2. Структура клінічних ознак з боку ШКТ у дітей з МЗС

Структура симптомів ураження ШКТ залежала від віку пацієнта. Для кожної підгрупи за віком (≥ 1 рік < 5 років; ≥ 5 років < 10 років; ≥ 10 років < 18 років) наведені показники відсоткової частки дітей, які виявили певні симптоми ураження шлунково-кишкового тракту.

У групі дітей віком від 1 до 5 років спостерігалось зниження апетиту у 83,3 % випадків, тоді як у групі віком від 5 до 10 років цей симптом був присутнім у всіх дітей (100,0 %). У дітей віком від 10 до 18 років зниження апетиту виявлено у 89,5 % випадків.

Нудота турбувала 33,3 % дітей віком від 1 до 5 років, 12,5 % пацієнтів другої вікової групи та 36,8 % осіб третьої вікової групи.

У третій віковій групі пацієнтів, біль у животі розлитого характеру та навколо пупка спостерігався у 63,2 % та 21,1 % дітей, відповідно, результати статистично достовірні ($p < 0,05$). Водяниста діарея була поширеною клінічною ознакою у всіх вікових групах: виявлена у половини дітей віком першої вікової групи, у чверті пацієнтів – другої групи та найчастіше виявлялась – у 68,4 % дітей третьої вікової групи (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Структура симптомів ураження ШКТ у трьох вікових групах

Скарга/Симптом	Вік (роки)		
	$\geq 1 < 5$ абс. число (%)	$\geq 5 < 10$ абс. число (%)	$\geq 10 < 18$ абс. число (%)
Зниження апетиту	5 (83,3)	8 (100,0)	17 (89,5)
Нудота	2 (33,3)	1 (12,5)	7 (36,8)
Бльовання 1-2 рази	3 (50,0)	3 (37,5)	5 (26,3)
Бльовання 3-6 разів	0 (0,0)	0 (0,0)	1 (5,3)
Водяниста діарея 1-3 рази	3 (50,0)	2 (25,0)	13 (68,4)*
Водяниста діарея 4-10 разів	0 (0,0)	0 (0,0)	1 (5,3)
Гемоколіт	0 (0,0)	0 (0,0)	2 (10,5)
Біль в животі розлитого характеру	2 (33,3)	3 (37,5)	12 (63,2)*
Біль в животі навколо пупка	1 (16,7)	0 (0,0)	4 (21,1)*

Примітка. * - результат статистично достовірний

Катаральні ознаки при МЗС у дітей не були типовими і не виявлялись в жодної дитини. Сухий кашель турбував третину (39,4 %) пацієнтів з МЗС. Задишка діагностовано в 11 пацієнтів: експіраторна – у двох (6,1 %), змішаного характеру – у дев'яти (27,3 %). Середнє значення частоти дихання становило 26,00 у хвилину [24,00; 28,00] (при середньому значенні 28,97 у хв.). При аускультатії легень виявлено ослаблене дихання у восьми дітей (24,2 %), сухі хрипи – у 7 (21,2 %), жорстке дихання – у більшості пацієнтів 31 (93,9 %). Насичення тканин киснем у пацієнтів з МЗС за рівнем SpO₂ на кімнатному повітрі було зниженим у восьми пацієнтів. Середнє його значення у всіх пацієнтів з МЗС становило 97,00 % [94,75; 98,00] (при середньому значенні 95,13 %). Слід відмітити, що вологі та крепітуючі хрипи не виявлялися в жодного пацієнта з МЗС. Задишка змішаного характеру превалювала над експіраторною і складала 35,5 %, водночас найчастіше ця клінічна ознака спостерігалася у пацієнтів третьої вікової групи і складала 36,8 %.

Однією з провідних ознак у дітей з МЗС асоційованого з SARS-CoV-2 дослідженої групи виявився кон'юнктивіт, який діагностовано у 29 (87,9 %), крововилив у склери – у двох (6,1 %).

Наступною за частотою клінічною ознакою був висип: плямисто-папульозний – у переважній більшості дітей 26 (78,8 %), геморагічний – у 19 (57,6 %). Зливний висип спостерігався у третини пацієнтів.

У дітей різних вікових груп плямисто-папульозний та геморагічний висип спостерігався з такою частотою: у першій віковій групі – у шести (100 %) дітей, у шести (100 %) пацієнтів; у другій – у шести (75,0 %), у чотирьох (50,0 %); у третій – 14 (73,3 %) та дев'яти (47,4 %), відповідно ($p < 0,05$).

Тенденцію до злиття висипу виявлено у чотирьох пацієнтів (66,7 %) – першої групи, у трьох (37,5 %) – другої групи та чотирьох (21,1 %) – третьої ($p < 0,05$). У всіх пацієнтів висип локалізувався на тулубі та кінцівках ($p < 0,05$) (рис.4.3).

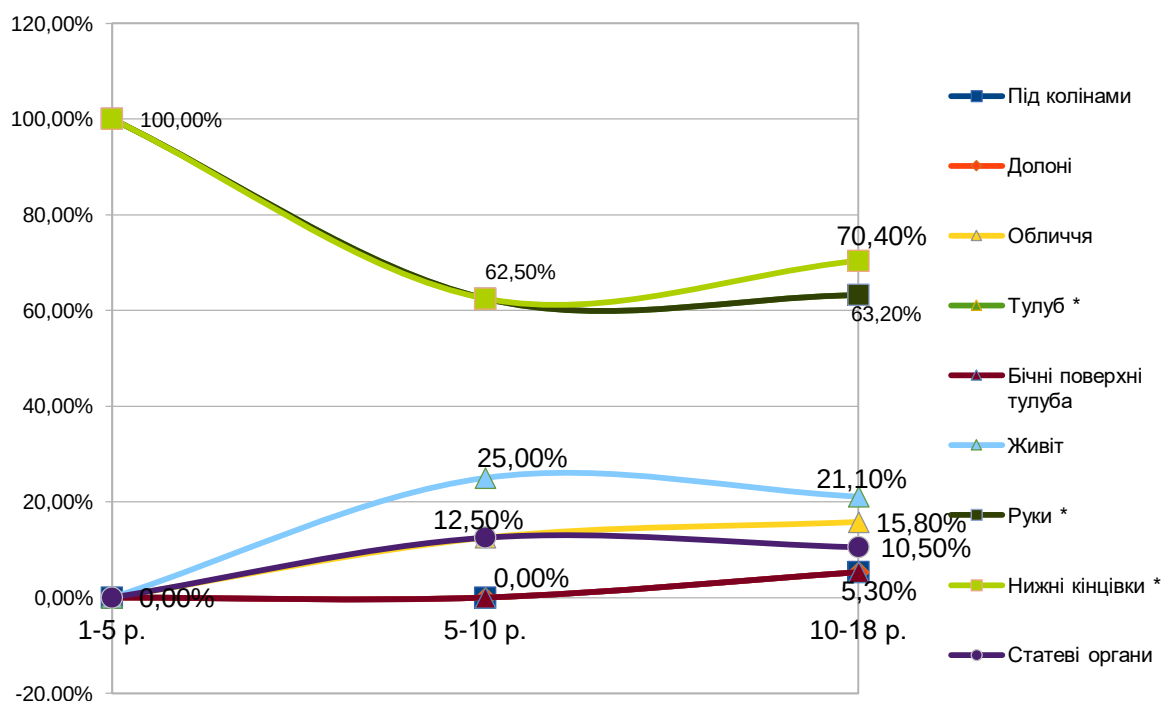


Рисунок 4.3. Локалізація висипу при МЗС залежно від віку

Пояснення. * результати статистично достовірні.

Ураження слизових оболонок виявлено у 27 пацієнтів (81,1 %). Малиновий язик спостерігався у 15 (45,5 %) дітей, яскраво червоні та розтріскані/пошкоджені губи спостерігалися у більше ніж половини дітей (17 осіб або 51,5 %).

У пацієнтів з МЗС одним з поширених клінічних проявів є набряк кистей рук – 16 осіб (48,5 %), набряк стоп – у шести (18,2 %). Поширений по тілу набряк спостерігався у трьох (9,1 %) пацієнтів.

Базуючись на УЗД у 15,15 % пацієнтів виявлено ознаки полісерозиту: рідина в черевній (45,45 %) та плевральній (15,15 %) порожнинах і в перикарді (12,12 %).

Аналіз за віком показав, що всі діти від 1 року до 5 років мали набряк кистей, але у них не спостерігався набряк стоп або поширення набряку. У 37,5 % дітей віком від 5 років до 10 років спостерігався набряк кистей. Як і в попередній віковій групі набряк не поширювався і був відсутній на стопах. У третій віковій групі спостерігався набряк на стопах і кистях, який мав тенденцію до поширення.

4.2. Динаміка показників загального аналізу крові у пацієнтів з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2

При дослідженні загального аналізу крові на момент госпіталізації у пацієнтів з МЗС спостерігався лейкоцитоз. Середнє його значення становило $12,40 \times 10^9/\text{л}$ [9,13; 27,10]. Лейкоцитоз поступово наростав і середнє його значення на третій день стаціонарного лікування становило $22,44 \times 10^9/\text{л}$ [14,63; 32,17]. Нейтрофіліоз був вираженим в усіх пацієнтів досліджуваної

групи на момент госпіталізації і середнє його значення становило $82,00 \times 10^9/\text{л}$ [80,00; 87,00] (при середньому значенні $82,13 \times 10^9/\text{л}$). Проте спостерігається тенденція до зростання нейтрофільних гранулоцитів на третій день лікування, середнє значення якого становило 85,50 % [74,50; 92,00] (при середньому значенні 79,80).

При визначенні рівня тромбоцитів на момент поступлення у пацієнтів досліджуваної групи середнє значення виявилось дещо зниженим та становило $148,00 \times 10^9/\text{л}$ [109,00; 214,00] ($p < 0,05$).

Простежили динаміку показників периферичної крові у пацієнтів з МЗС у хворих кожної вікової групи зокрема, виявлені найвищі значення показника лейкоцитів при госпіталізації у першій віковій групі з середнім значенням показника $18,78 \times 10^9/\text{л}$ [11,37; 25,19] ($p < 0,05$). Однак цей же показник у динаміці на третій день був найвищим у пацієнтів третьої вікової групи з середнім його значенням $23,64 \times 10^9/\text{л}$ [11,79; 39,00] ($p < 0,05$). Нейтрофільні гранулоцити при госпіталізації були найвищими у другій віковій групі з середнім значенням 87,50 % [81,75; 92,25] (при середньому значенні 87,20 %), ($p < 0,05$). У динаміці цей показник був незначно вищим у третій віковій групі досліджуваних, середнє значення якого становило 88,90 % [82,00; 92,00] (при середньому значенні 86,26 %), ($p < 0,05$). Середнє значення показника тромбоцитів, як при госпіталізації так і на третій день лікування було найнижчим у віковій групі від 5 до 10 років і становило $102,00 \times 10^9/\text{л}$ [89,75; 111,50] та $123,00 \times 10^9/\text{л}$ [68,25; 146,25] ($p < 0,05$) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Динаміка показників периферичної крові у пацієнтів з МЗС у трьох вікових групах
(з урахуванням $M \pm SD/Me$ [25%; 75%])

Показник (рівень)	Вік (роки)	$M \pm SD/Me$ [25%; 75%]**	Min	Max	
Гемоглобін при госпіталізації (г/л)	$\geq 1 < 5$	$108,17 \pm 10,01$	94	120	$p < 0,011^*$
	$\geq 5 < 10$	$106,88 \pm 8,46$	91	118	
	$\geq 10 < 18$	$125,05 \pm 23,16$	80	189	
Гемоглобін через три дні (г/л)	$\geq 1 < 5$	$105,17 \pm 11,29$	88	116	$p > 0,05$
	$\geq 5 < 10$	$101,50 \pm 8,40$	88	111	
	$\geq 10 < 18$	$114,22 \pm 20,47$	78	163	
Лейкоцити при госпіталізації ($10^9/\text{л}$)	$\geq 1 < 5$	18,78 [11,37; 25,19]	9,13	29,67	$p > 0,05$
	$\geq 5 < 10$	11,99 [11,60; 16,55]	7,2	35	
	$\geq 10 < 18$	12,40 [8,45; 27,09]	5,35	45	
Лейкоцити через три дні ($10^9/\text{л}$)	$\geq 1 < 5$	18,22 [11,65; 21,60]	9,79	31,96	$p > 0,05$
	$\geq 5 < 10$	$22,70 \pm 5,91$	14,71	32,8	
	$\geq 10 < 18$	23,64 [11,79; 39,00]	8,43	67,2	
Нейтрофільні гранулоцити при госпіталізації (%)	$\geq 1 < 5$	$71,17 \pm 13,39$	45	82	$p < 0,006^*$
	$\geq 5 < 10$	$87,20 \pm 5,87$	79,6	95	
	$\geq 10 < 18$	$83,46 \pm 5,40$	72	98	
Нейтрофільні гранулоцити через три дні (%)	$\geq 1 < 5$	$52,33 \pm 12,77$	37	73	$p < 0,001^*$
	$\geq 5 < 10$	$85,88 \pm 7,88$	75	98	
	$\geq 10 < 18$	$86,26 \pm 9,16$	63	97	
Лімфоцити при госпіталізації (%)	$\geq 1 < 5$	17,50 [16,25; 18,00]	15	50	$p < 0,004^*$
	$\geq 5 < 10$	9,00 [5,28; 12,50]	4	15,2	
	$\geq 10 < 18$	12,00 [8,00; 14,00]	1,1	32,7	

Продовження таблиці 4.2

Показник (рівень)	Вік (роки)	M±SD/Me [25%; 75%]**	Min	Max	
Лімфоцити через три дні (%)	≥1 <5	43,50 ± 12,37	25	56	p<0,001*
	≥5 <10	9,50 [6,88; 14,00]	2	25	
	≥10 <18	8,00 [4,93; 12,00]	2	27	
Тромбоцити при госпіталізації (10 ⁹ /л)	≥1 <5	162,00 [122,50; 263,75]	109	354	p<0,005*
	≥5 <10	102,00 [89,75; 111,50]	43	148	
	≥10 <18	172,00 [120,00; 239,50]	94	499	
Тромбоцити через три дні (10 ⁹ /л)	≥1 <5	306,50 [230,50; 335,25]	211	537	p<0,009*
	≥5 <10	123,00 [68,25; 146,25]	21	194	
	≥10 <18	138,00 [115,75; 192,50]	52	888	

Примітка. * – різниця достовірна, ** - у випадку негаусівського розподілу результати наведені у вигляді Me [25%; 75%]

4.3. Характеристика маркерів запалення у пацієнтів з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 з урахуванням віку

Привертають увагу біохімічні маркери запалення: СРП, ШОЕ, прокальцитонін та ІЛ-6, серединні значення яких виявляються високими як на момент госпіталізації, так і на третій день стаціонарного лікування. Деякі з них надалі мали тенденцію до зростання. Серединне значення ШОЕ при госпіталізації становило 24,00 мм/год [18,00; 35,00], у динаміці (на третій день) цей показник був 20,00 мм/год [11,75; 31,25] та через шість днів від моменту госпіталізації наріс до 28,00 мм/год [9,50; 39,25]. Динаміка наростання серединного значення показника СРП з моменту госпіталізації та кожні 3 дні мала такий вигляд: 80,00 мг/л [24,00; 98,00]; 96,00 мг/л [48,00; 192,00] та 24,00 мг/л [7,50; 48,00]. Показник серединного значення прокальцитоніну при госпіталізації та кожні три дні надалі мав таку динаміку: 2,39 нг\мл [0,53; 7,90]; 0,70 нг\мл [0,15; 3,46]; 0,10 нг\мл [0,05; 1,99], відповідно. Серединне значення ІЛ-6 становило 12,65 пг/мл при госпіталізації [9,45; 18,88], надалі цей показник був від'ємний (рис.4.4).

У 34 обстежуваних пацієнтів із МЗС ІЛ-2 як при первинному, так і при повторному заборі був виявлений негативним (табл. 3.4).

МЗС

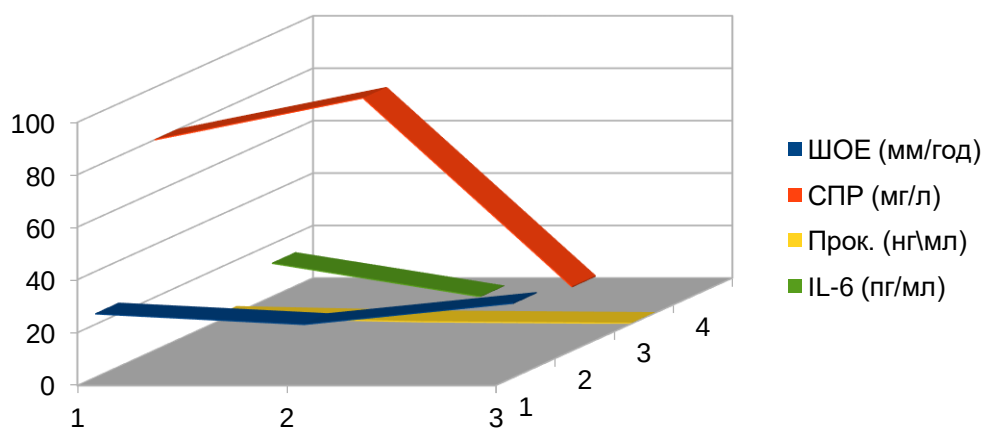


Рисунок 4.4. Динаміка серединного значення показників запальних маркерів у хворих з МЗС

4.4. Показники протеїнограми у пацієнтів з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2

Патогенетичні процеси при МЗС призвели до порушення білкового обміну, в результаті чого у частини пацієнтів розвинулися набряки та полісерозит.

При дослідженні рівня загального білка у крові пацієнтів з МЗС на момент поступлення у стаціонар виявлено, що середнє його значення було в межах норми і становило 55,60 г/л [48,45; 59,25] (при середньому значенні 55,26 г/л). Проте у динаміці загальний білок знижувався з середнім його значенням на третій день лікування – 52,00 г/л [48,25; 56,95] (при середньому значенні 52,02 г/л). При вивченні значення альбуміну у перший день лікування пацієнтів з МЗС виявлено, що середнє його значення було зниженим і становило 42,00 г/л [36,18; 48,00] (при середньому значенні 42,41 г/л). При контрольній діагностиці (на третю добу лікування) середнє значення показника альбуміну знизилось майже вдвічі від верхньої границі норми і становило 35,00 г/л [23,50; 39,70] (при середньому значенні 33,23 г/л). У пацієнтів з МЗС після лікування покращилася білково-синтетична функція, яка відображена у біохімічних аналізах: середнє значення 65,90 г/л [59,20; 71,80] (при середньому значенні 65,48 г/л) і було в межах норми; та альбуміну – 54,00 г/л [52,95; 54,00] (при середньому значенні 53,63 г/л) з вираженою тенденцією до зростання.

При вивченні загального білка на момент поступлення у пацієнтів з МЗС у різних вікових групах отримано такі результати: середнє значення цього показника у першій віковій групі було найвищим і становило 55,80 г/л [54,93; 56,38] (при середньому значенні 57,23 г/л); у другій – 60,00 г/л [51,90; 62,00] (при середньому значенні 56,69 г/л); у третій – найнижчим – 52,00 г/л [48,30; 57,03] (при середньому значенні 54,11 г/л), ($p > 0,05$). Альбумінова фракція протеїнограми у пацієнтів третьої вікової групи виявилася найнижчою із середнім значенням 39,00 г/л [33,70; 43,00] (при середньому значенні 39,32 г/л). Водночас середнє значення альбуміну у пацієнтів другої вікової групи виявилось найвищим у когорті дослідження і становило 54,50 г/л [50,25; 59,00] (при середньому значенні 54,75 г/л). Тоді як середнє значення альбуміну у наймолодшій віковій групі було нижчим ніж у попередній і становило 44,00 г/л [41,50; 46,50] (при середньому значенні 44,00 г/л), ($p < 0,05$). Після проведеного лікування у пацієнтів другої та третьої вікових груп середнє значення загального білка було достатнім і становило 68,70 г/л [70,00; 73,03] (при середньому значенні 68,95 г/л) та 65,00 г/л [60,00; 69,00] (при середньому значенні 65,09 г/л) відповідно. Водночас цей показник у пацієнтів першої вікової групи був найнижчим, проте в межах норми і становив 58,00 г/л [55,85; 62,15] (при середньому значенні 59,33 г/л), ($p > 0,05$).

4.5. Результати досліджень показників Д-димеру та феритину у пацієнтів з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2

Важливим показником гемостазу є Д-димер, середнє значення якого на момент поступлення становило 4083,50 нгФЕОд/мл [2772,75; 5493,00], яке втричі перевищувало верхню границю норми. При повторному визначенні на третій день лікування середнє його значення становило – 1060,00 нгФЕОд/мл [724,50; 3462,50].

Найвище середнє значення Д-димеру на момент поступлення виявлено у пацієнтів третьої вікової групи (вік від 10 до 18 років) і становило 4661,00 нгФЕОд/мл [3026,50; 5610,50]. Дещо нижчі значення цього показника діагностовано у пацієнтів другої вікової групи (вік від 5 до 10 років) 4280,00 нгФЕОд/мл [2016,00; 5723,50], а найнижчі у пацієнтів першої вікової групи (вік від 1 до 5 років) – 2938,50 нгФЕОд/мл [2897,00; 3197,50]. Значення Д-димеру у динаміці (на третій день лікування) вдалося визначити у пацієнтів третьої вікової групи, яке становило 1060,00 нгФЕОд/мл [724,50; 3462,50]. Результати статистично недостовірні ($p > 0,05$).

Одним з важливих показників, який вивчався у пацієнтів з МЗС був феритин. Середнє значення феритину на момент поступлення становило 412,00 нг/мл [238,50; 702,50].

Нами вивчався рівень феритину у різних вікових групах, середнє значення якого діагностовано у пацієнтів третьої вікової групи і становило 473,00 нг/мл [345,00; 725,00]. Середнє значення показника феритину при поступленні зменшувалось залежно від віку: у другій віковій групі цей показник становив 298,50 нг/мл [187,65; 708,75], у першій віковій групі – 233,00 нг/мл [207,75; 371,50]. При повторному визначенні феритину виявлено наростання його середнього значення у третій віковій групі – 504,50 нг/мл [492,00; 862,75], ($p > 0,05$).

При дослідженні ПІ нами виявлено, що у пацієнтів з МЗС цей показник при госпіталізації був в межах норми і середнє його значення 92,00 % [76,20; 101,00] (при середньому значенні 95,28 %). ПЧ теж не відрізнявся від норми як при поступленні у стаціонар, такі у динаміці. Міжнародне нормалізоване відношення (англ. International normalized ratio, INR) у пацієнтів з МЗС теж виявилось в нормі. Функція коагуляції у пацієнтів з МЗС не була порушеною. ПЧ не залежав від віку пацієнтів і був в межах вікової норми. Проте середнє значення ПІ виявилось високим у пацієнтів першої вікової групи і становило 148,00 % [138,00; 149,00] (при середньому значенні 142,00 %), у пацієнтів другої та третьої вікових груп середнє значення цього показника було в межах норм і становило 92,50 % [84,08; 108,30] (при середньому значенні 99,66 %); 89,00 % [75,83; 93,78] (при середньому значенні 85,84 %), відповідно ($p < 0,05$). У пацієнтів з МЗС середнє значення показника АЧТЧ при госпіталізації становило 30,20 с [25,45; 31,75] (при середньому значенні 29,71 с).

Дані досліджень гемостазу у дітей з МЗС з урахуванням віку представлені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Динаміка показників коагулограми у пацієнтів з МЗС залежно від віку

Показник	МЗС	$M \pm SD / Me [25\%; 75\%]**$	Min	Max	p
ПЧ (сек.) при госпіталізації	$\geq 1 \text{ p.} < 5 \text{ p.}$	$12,30 \pm 1,04$	11,1	13	$p > 0,05$
	$\geq 5 \text{ p.} < 10 \text{ p.}$	$13,38 \pm 1,81$	10,3	15,3	
	$\geq 10 \text{ p.} < 18 \text{ p.}$	$14,45 \pm 2,31$	11,8	19,4	
ПЧ (сек.) через три дні	$\geq 5 \text{ p.} < 10 \text{ p.}$	$13,53 \pm 1,49$	11,3	14,4	$p > 0,05$
	$\geq 10 \text{ p.} < 18 \text{ p.}$	$16,06 \pm 3,44$	13,2	21,7	
ПІ (%) при госпіталізації	$\geq 1 \text{ p.} < 5 \text{ p.}$	$142,00 \pm 12,17$	128	150	$p < 0,026^*$
	$\geq 5 \text{ p.} < 10 \text{ p.}$	$99,66 \pm 27,51$	71,4	150	
	$\geq 10 \text{ p.} < 18 \text{ p.}$	$85,54 \pm 14,80$	60,2	112,8	
ПІ (%) через три дні	$\geq 5 \text{ p.} < 10 \text{ p.}$	80,00 [79,78; 96,80]	79,1	147,2	$p > 0,05$
	$\geq 10 \text{ p.} < 18 \text{ p.}$	$98,82 \pm 28,11$	52,7	118,2	
INR при госпіталізації (%)	$\geq 1 \text{ p.} < 5 \text{ p.}$	$0,97 \pm 0,20$	0,85	1,2	$p > 0,05$
	$\geq 5 \text{ p.} < 10 \text{ p.}$	$1,02 \pm 0,14$	0,79	1,2	
	$\geq 10 \text{ p.} < 18 \text{ p.}$	$1,13 \pm 0,26$	0,95	2,02	
INR у динаміці (%)	$\geq 5 \text{ p.} < 10 \text{ p.}$	$0,99 \pm 0,17$	0,87	1,11	$p > 0,05$
	$\geq 10 \text{ p.} < 18 \text{ p.}$	$0,97 \pm 0,05$	0,93	1,04	

Продовження таблиці 4.3

Показник	МЗС	M±SD/Me [25%; 75%]**	Min	Max	p
Фібриноген при госпіталізації (г/л)	≥1 р. <5 р.	2,83 ± 0,67	2,1	3,4	p>0,05
	≥5 р. <10 р.	4,17 ± 0,88	3,2	5,2	
	≥10 р. <18 р.	3,85 ± 0,96	2,28	5,8	
Фібриноген у динаміці (г/л)	≥5 р. <10 р.	3,95 ± 0,99	2,8	4,52	p>0,05
	≥10 р. <18 р.	3,42 ± 1,25	1,3	4,6	

Примітка. * – різниця достовірна, ** - у випадку негаусівського розподілу результати наведені у вигляді Me [25%; 75%]

При визначенні тропоніну I у сироватці пацієнтів з МЗС середнє його значення було дещо підвищене і становило 0,20 нг/мл [0,12; 0,35]. У вікових групах пацієнтів цей показник відрізнявся: у дітей першої вікової групи був у межах норми – 0,11 нг/мл [0,10; 0,11], проте підвищене середнє значення тропоніну I виявлено у другій та третій вікових групах: 0,20 нг/мл [0,16; 0,32] та 0,24 нг/мл [0,14; 0,66], відповідно ($p < 0,05$).

4.6. Виявлення IgA, IgM, IgG до SARS-CoV-2 у сироватці крові дітей з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2

Пацієнтам з МЗС при поступленні у стаціонар проводилось дослідження значень IgA, IgM, IgG до SARS-CoV-2. У більшості дітей з МЗС були позитивні лише IgG, частина з них мали позитивні IgA та IgG і частина пацієнтів мали позитивні всі класи Ig до SARS-CoV-2.

Найвищими виявилися показники IgG-S до SARS-CoV-2, середнє значення якого становило 8,87 [6,80; 9,68], середнє значення IgG-N до SARS-CoV-2, було нижчим і становило 6,96 [3,33; 7,61] ($p < 0,05$). При повторному визначенні (через 3 міс) IgG-S та IgG-N до SARS-CoV-2 виявлено такі зміни: наростання рівня IgG-S та зниження IgG-N до SARS-CoV-2 з відповідними показниками середнього значення – 9,19 [7,37; 9,28] та 1,53 [1,06; 2,59] відповідно.

Показник IgG-S до SARS-CoV-2 відрізнявся залежно від віку пацієнта. Середнє значення його було найвищим у другій віковій групі і становило 9,15 [8,91; 10,42]. Дещо нижчим виявився цей показник у пацієнтів першої вікової групи 8,93 [8,90; 8,93] (при середньому значенні 8,67), а найнижчим – 8,42 [6,58; 9,61] був у третій групі за віком. IgG-S тривало утримувався підвищеним і через три місяці середнє його значення не надто відрізнявся від попереднього – 9,19 [7,37; 9,28].

При дослідженні IgM та IgA до SARS-CoV-2 виявлено, що середнє значення IgM було найнижчим і становило 0,28 [0,15; 1,33]. Незначно відрізнялось середнє значення IgA – 0,43 [0,20; 1,22].

4.7. Кореляційні зв'язки загально-клінічних, біохімічних, імунологічних результатів досліджень у пацієнтів з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2

Дослідження кореляційних взаємозв'язків серед пацієнтів із МЗС, асоційованим із SARS-CoV-2, продемонструвало прямий зв'язок між рівнем лейкоцитів та показником ШОЕ при госпіталізації ($r = +0,42$; $p < 0,05$). Також виявлено середньої сили позитивний кореляційний зв'язок між показниками лейкоцитів та ПІ на момент госпіталізації ($r = +0,46$; $p < 0,05$).

Слід зазначити, що існує функціональний прямий кореляційний зв'язок між рівнями IgA1 та феритином на третій день лікування, а також між IgA1 та прокальцитоніном на третій день госпіталізації: ($r = +1$; $p < 0,0001$) та ($r = +1$, $p < 0,0001$) відповідно. Аналогічний кореляційний зв'язок був виявлений між рівнем IgA1 та фібриногеном на третій день терапії ($r = +1$; $p < 0,0001$).

Виявлено середньої сили позитивний кореляційний зв'язок між рівнем IgA1 та ПІ на момент госпіталізації ($r = +0,58$; $p < 0,05$). Зауважено, що в той же час існує функціональний зворотний кореляційний зв'язок між показником IgA1 та ПІ на третій день госпіталізації ($r = -1$; $p < 0,0001$).

Важливим виявився також показник IgM1 до SARS-CoV-2, який мав функціональний кореляційний зв'язок з показником INR при госпіталізації ($r = +1$; $p < 0,0001$). Крім того, були встановлені середньої сили позитивні кореляційні зв'язки між показниками IgM1 та показниками ШОЕ та СРП при госпіталізації ($r = +0,42$; $p < 0,05$) та ($r = +0,40$; $p < 0,05$) відповідно.

Отримано середньої сили позитивний кореляційний зв'язок між рівнем IgG1 до SARS-CoV-2 та показниками лейкоцитів та ШОЕ на момент госпіталізації ($r = +0,37$; $p < 0,05$) та ($r = +0,61$; $p < 0,05$), відповідно. Також виявлено сильний негативний кореляційний зв'язок між рівнем IgG та ПІ на третю добу госпіталізації ($r = -0,77$; $p < 0,05$), а також середньої сили негативний кореляційний зв'язок між рівнем IgG1 та загальним білком при госпіталізації ($r = -0,40$; $p < 0,05$). Спостерігається прямий кореляційний зв'язок помірної сили між IL-6 і IgG-S ($r = +0,414$; $p > 0,05$). При аналізі Д-димеру у пацієнтів із МЗС, виявлено статистично значущі прямі та зворотні кореляційні зв'язки, які представлені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Результати кореляційного аналізу (коефіцієнт R) між рівнем Д-димеру та іншими показниками крові у дітей із МЗС

Д-димер	Показники	Кореляційний зв'язок
	Феритин	0,41*
	Прокальцитонін 1	0,56*
	Прокальцитонін 2	0,77*
	Гемоглобін 3	-0,38*
	Еритроцити 3	-0,37*
	ШОЕ 3	0,50*
	Нейтрофіли 1	0,25
	ПЧ 1	0,42*
	ПІ 1	-0,38*
	ПІ 2	-0,91*
	ПІ 3	-0,84*
	INR_1	0,97*
	Фібриноген 1	0,32
	Фібриноген 3	0,92*

Примітка. * – кореляційний зв'язок достовірний ($p < 0,05$)

Зокрема, встановлено помірний прямий кореляційний зв'язок між рівнем прокальцитоніну 1 та показниками тромбоцитів ($r = +0,42$; $p = 0,0426$) та фібриногеном 1 ($r = +0,59$; $p = 0,0075$). Зауважено значущий вплив на рівень прокальцитоніну 1 таких параметрів, як гемоглобін на третій день лікування ($r = -0,54$; $p = 0,0046$), нейтрофіли при госпіталізації ($r = +0,80$; $p < 0,0001$), нейтрофіли (третій день лікування) ($r = +0,54$; $p = 0,0052$), тромбоцити (третій день лікування) ($r = -0,50$; $p = 0,0097$), еритроцити при поступленні ($r = -0,51$; $p = 0,0088$), та еритроцити (третій день лікування) ($r = -0,65$; $p = 0,0004$). Наведені результати свідчать про важливі аспекти взаємозв'язку між рівнем

прокальцитоніну при госпіталізації та різними показниками крові у дітей з МЗС. У таблиці 4.5 наведено результати кореляційного аналізу між рівнем прокальцитоніну 1 та іншими показниками крові у дітей із МЗС асоційованим з SARS-CoV-2, а також вказано ступінь взаємозв'язку, представлений коефіцієнтом R, та рівень статистичної достовірності, виражений значенням p.

Таблиця 4.5

Результати кореляційного аналізу (коефіцієнт R) між рівнем прокальцитоніну при госпіталізації та іншими показниками крові у дітей із МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2

Прокальцитонін при госпіталізації	Показник	R	p
	Тропонін (при госпіталізації)	0,42	0,0426*
	Гемоглобін (6 день лікування)	-0,54	0,0046*
	Нейтрофіли (при госпіталізації)	0,80	<.0001*
	Нейтрофіли (6 день лікування)	0,54	0,0052*
	Тромбоцити (6 день лікування)	-0,50	0,0097*
	Еритроцити (при госпіталізації)	-0,51	0,0088*
	Еритроцити (6 день лікування)	-0,65	0,0004*
	Фібриноген (при госпіталізації)	0,59	0,0075*

Примітка. * – кореляційний зв'язок достовірний ($p < 0,05$)

Аналізуючи кореляційні взаємозв'язки на момент госпіталізації між різними показниками у пацієнтів з МЗС, отримані наступні результати: прямий кореляційний зв'язок середньої сили виявлено між рівнем ІЛ-6 1 та АЛТ 1 ($r = +0,54$; $p = 0,0276$), а також між ІЛ-6 1 та феритином 1 ($r = +0,62$; $p = 0,0092$).

Для показника СРП 1 (при госпіталізації) виявлено негативний кореляційний зв'язок високої сили з ПЧ 3 (шостий день лікування) ($r = -0,85$; $p = 0,0136$), та позитивні кореляційні зв'язки високої сили з фібриноген 2 (третій день лікування) ($r = +0,87$; $p = 0,004$) та фібриноген 3 (шостий день лікування) ($r = +0,93$; $p = 0,0054$). Додатково, виявлені зворотні кореляційні зв'язки слабкої сили з альбуміном 1 ($r = -0,20$; $p > 0,05$).

У випадку СРП 2 (третій день лікування) виявлено негативні кореляційні зв'язки помірної сили з ПІ 1 (при госпіталізації) ($r = -0,17$; $p = 0,3589$), ПІ 2 (третій день лікування) ($r = -0,79$; $p = 0,01$) та ПІ 3 (шостий день лікування) ($r = -0,80$; $p = 0,0289$).

З показником СРП 1 не виявлено статистично значущих кореляційних взаємозв'язків з прокальцитоніном 1 ($r = +0,28$; $p = 0,3204$) та іншими вказаними показниками. У таблиці 4.6 наведено взаємозв'язки між запальними маркерами крові (ІЛ-6 та СРП) у пацієнтів із МЗС на час госпіталізації та СРП на третій день лікування, а також їх кореляцію з іншими біохімічними показниками. Рівень статистичної значущості зазначений для виявлених зв'язків.

Встановлено прямий кореляційний зв'язок між рівнями: ІЛ-6 1 та АЛТ 1 ($r = +0,54$; $p = 0,0276$), ІЛ-6 1 та феритину 1 ($r = +0,62$; $p = 0,0092$), СРП 1 та фібриногену 2 ($r = +0,87$; $p = 0,004$) та СРП 1 і фібриногену 3 ($r = +0,93$; $p = 0,0054$) (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Результати кореляційного аналізу (коефіцієнт R) між різними показниками при госпіталізації та у динаміці у дітей із МЗС

Показник	Показник	R	p
ІЛ-6 1	Феритин 1	0,62	0,0092*
ІЛ-6 1	Прокальцитонін 1	0,28	0,3204
СРП 1	ПЧ 3	-0,85	0,0136*
СРП 1	Фібриноген 2	0,87	0,004*
СРП 1	Фібриноген 3	0,93	0,0054*
СРП 1	Загальний білок 1	-0,18	0,3056
СРП 1	Загальний білок 2	-0,12	0,6213
СРП 1	Альбумін 1	-0,20	0,3038
СРП 1	Альбумін 2	0,45	0,1381
СРП 2	ПІ 2	-0,79	0,01*
СРП 2	ПІ 3	-0,80	0,0289*

Примітка. * – кореляційний зв'язок достовірний ($p < 0,05$)

4.7 Результати рентгенологічної, сонографічної діагностики легень та серця

Однією з провідних уражених систем виявилось ушкодження дихальної системи, діагностованих рентгенологічно. Серед 33 обстежених пацієнтів з МЗС у шести дітей (18,8 %) (95%ДІ: 7,8-34,7 %) діагностовано двобічну нижньочасточкову пневмонію, у трьох (9,4 %) (95%ДІ: 2,3-23,0 %) – правобічну вогнищеву пневмонію, у двох (6,3 %) (95%ДІ: 1,0-18,6 %) – двобічну вогнищеву пневмонію; правобічний пневмоторакс – в однієї дитини (3,1 %) (95%ДІ: 0,1-13,7 %) та у чотирьох (12,5 %) (95%ДІ: 4,0-27,1 %) – тимомегалію.

Розвиток пневмонії різної локалізації виявився залежним від віку дитини. Найчастіше випадки пневмонії реєструвалися серед дітей другої вікової групи – 57,14 %, незначно поступались за кількістю діти з діагностованими пневмоніями (52,63 %) третьої вікової групи. МЗС у дітей віком від одного до п'яти років розвивався не часто (у шести дітей), проте у половини з них діагностовано пневмонію. Розподіл за локалізацією пневмонії у різних вікових групах представлено у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Рентгенологічні ознаки ураження легень у пацієнтів з МЗС залежно від віку наведено у відсотках та 95% ДІ

Рентгенологічні ознаки	Вік (роки) / (% ДІ)		
	$\geq 1 < 5$ % (95% ДІ)	$\geq 5 < 10$ % (95% ДІ)	$\geq 10 < 18$ % (95% ДІ)
Інтерстиціальна пневмонія	0,0 (0,0-35,5)	28,6 (4,6-66,8)	5,3 (0,2-22,3)
Правобічна вогнищеву пневмонія	16,7 (0,5-58,3)	0,0 (0,0-31,2)	10,5 (1,7-29,9)
Правобічна нижньочасточкова пневмонія	0,0 (0,0-35,5)	0,0 (0,0-31,2)	15,8 (4,0-36,7)
Лівобічна вогнищеву пневмонія	0,0 (0,0-35,5)	0,0 (0,0-31,2)	0,0 (0,0-12,6)
Лівобічна нижньодолева пневмонія	0,0 (0,0-35,5)	0,0 (0,0-31,2)	0,0 (0,0-12,6)
Двобічна вогнищеву пневмонія	33,3 (5,4-73,9)	0,0 (0,0-31,2)	0,0 (0,0-12,6)
Двобічна полісегментарна пневмонія	0,0 (0,0-35,5)	0,0 (0,0-31,2)	0,0 (0,0-12,6)

Рентгенологічні ознаки	Вік (роки) / (% ДІ)		
	$\geq 1 < 5$ % (95% ДІ)	$\geq 5 < 10$ % (95% ДІ)	$\geq 10 < 18$ % (95% ДІ)
Двобічна нижньочасточкова пневмонія	0,0 (0,0-35,5)	28,6 (4,6-66,8)	21,1 (6,9-43,0)
Ателектаз зліва у верхній долі	0,0 (0,0-35,5)	0,0 (0,0-31,2)	0,0 (0,0-12,6)
Правобічний плеврит	0,0 (0,0-35,5)	0,0 (0,0-31,2)	0,0 (0,0-12,6)
Правобічна пневмонія верхньої та середньої долі	0,0 (0,0-35,5)	0,0 (0,0-31,2)	0,0 (0,0-12,6)
Правобічний пневмоторакс	0,0 (0,0-35,5)	0,0 (0,0-31,2)	5,3 (0,2-22,3)

Аналізуючи результати дослідження ЕХО-КГ, діагностовано, що фракція викиду в середньому становила $63,9 \% \pm 1,2$ (min-37; max-72), низьку -54-56 % виявлено у трьох пацієнтів; гідроперикард – у чотирьох осіб (12,12 %); у 20 дітей (60,61 %) – лінійне розширення коронарних судин більше 0,3 см до 1,4 см.

4.8. Персоніфікована ризик-орієнтована модель прогнозування ураження коронарних судин

З-поміж аналізованих даних, за допомогою методу логістичної регресії, ми виокремили 7 факторів, які при поєднаній дії мають вірогідний вплив на ураження коронарних судин у госпіталізованих дітей з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2. Фактори та їх коефіцієнти регресії наведено у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8

Коефіцієнти регресії факторів, які при поєднаній дії впливають на ураження коронарних судин у госпіталізованих дітей з МЗС

№ з/п	Фактори	Умовне позначення	Коефіцієнти регресії (β_i)
1.	Рівень Д-димеру (нгФЕОд/мл)	X1	0,0008
2.	Рівень феритину (нг/мл)	X2	0,0001
3.	Рівень прокальцитоніну (нг/мл)	X3	0,0011
4.	Кількість тромбоцитів ($\times 10^9/\text{л}$)	X4	-0,0145
5.	Рівень СРП (мг/л)	X5	0,0061
6.	Протромбіновий індекс (%)	X6	0,3391
7.	Вміст альбуміну (г/л)	X7	-0,2411
	Константа		-22,4705

Усі аналізовані фактори наводяться у кількісному значенні при госпіталізації.

Два фактори з зазначених семи мають зворотний зв'язок з ураженням серця: рівні тромбоцитів та альбуміну. Тобто при тромбоцитопенії та при гіпоальбумінемії зростає ризик даної нозології. Натомість інші п'ять факторів мають провокуючий вплив: при зростанні їх абсолютного значення зростає ризик ураження коронарних судин у госпіталізованих дітей з МЗС.

Достовірність обчислених коефіцієнтів перевірено за допомогою методу Вальда, а цілої моделі – за допомогою ксі-квадрату, значення якого становить 19,1 та вказує на те, що модель є достовірною з вірогідністю помилки менше 5% ($p < 0,05$).

Підставивши у формулу (2.1) результати, отримані за методом логістичної регресії, нами було виведено рівняння для визначення С, що є першим статистичним етапом при прогнозуванні вірогідності ураження коронарних судин у дітей з групи дослідження з МЗС:

$$C = 0,0008 * X_1 + 0,0001 * X_2 + 0,0011 * X_3 - 0,0145 * X_4 + 0,0061 * X_5 + + 0,3391 * X_6 - 0,2411 * X_7 - 22,4705$$

Розраховане значення С для кожної дитини на другому етапі підставляється у рівняння 2.2. Отримане значення R вказує на вірогідність ураження коронарних судин у конкретної дитини з МЗС: результат до 50% вказує на низький ризик ураження коронарних судин, натомість 50% та вище вказує на високий ризик ураження коронарних судин.

Клінічний приклад №1, дитина N 5.

Вік дитини 16 років. Відомо, що на момент поступлення у неї Д-димер становив 6820 нгФЕОд/мл; феритин – 180,2 нг/мл; прокальцитонін – 55,4 нг/мл; тромбоцити – 95×10^9 /л; СРП – 80 мг/мл; протромбіновий індекс – 71,4 %; альбумін – 48 г/л. Підставивши ці дані у формули 2.1 та 2.2 отримаємо:

$$C = 0,0008 * 6820 + 0,0001 * 180,2 + 0,0011 * 55,4 - 0,0145 * 95 + 0,0061 * 80 + + 0,3391 * 71,4 - 0,2411 * 48 - 22,4705 = -5,19$$

$$R = \frac{1}{1 + e^{5,19}} * 100\% = 0,55\%$$

Тобто, виходячи з проведених розрахунків, у цієї дитини є низька вірогідність ураження коронарних судин, оскільки отримане значення R є менше 50%. Подальше спостереження показало, що у цього пацієнта ураження коронарних судин не розвинулось, тобто наш прогноз справдився.

Клінічний приклад №2, дитина N 6.

Відомо, що на момент поступлення у дитини Д-димер становив 3967 нгФЕОд/мл; феритин – 715 нг/мл; прокальцитонін – 7,65 нг/мл; тромбоцити – 114×10^9 /л; СРП – 24 мг/мл; протромбіновий індекс – 93,1 %; альбумін – 38 г/л. Підставивши ці дані в формули 2.1 та 2.2 отримаємо:

$$C = 0,0008 * 3967 + 0,0001 * 715 + 0,0011 * 7,65 - 0,0145 * 114 + 0,0061 * 24 + + 0,3391 * 93,1 - 0,2411 * 38 - 22,4705 = 1,68$$

$$R = \frac{1}{1 + e^{-1,68}} * 100\% = 84,29\%$$

Тобто, виходячи з проведених розрахунків, у цього пацієнта є високий ризик ураження коронарних судин, оскільки отримане значення R є більшим 50 %. Подальше спостереження показало, що у цієї дитини в подальшому підтверджено ураження коронарних судин, тобто наш прогноз справдився.

Згідно з проведеними розрахунками, встановлено, що у цієї дитини існує значний ризик ураження коронарних судин, оскільки отримане значення R перевищує 50%. Спостереження, яке проводилося надалі, підтвердило наші прогнози, підтверджуючи розвиток ураження коронарних судин в даному випадку.

На основі ретроспективної бази даних пацієнтів, нами було проаналізовано основні діагностичні параметри опрацьованої прогностичної моделі. Загальна точність становила 78,79%, при добрій чутливості (73,91%) та специфічності (90,00%).

ВИСНОВКИ

1. Узагальнюючи результати досліджень, визначено, що серединний вік пацієнтів з МЗС становив 10,40 років [7,00; 14,00]. У двох дітей виявлено ожиріння (6,06 %), в однієї – білково-енергетична недостатність (3,03 %). Середня тривалість хвороби на догоспітальному етапі – $6,79 \pm 2,15$ (min-2; max-12дні). Причинами госпіталізації були: підвищена температура тіла (100 %), негнійне ураження кон'юнктив (94 %), поліморфна екзантема (87,8 %), діарейний синдром (63,64 %), абдомінальний (больовий) синдром (63,63 %), набряковий синдром (42,4 %). Сухий кашель турбував третину (39,4 %) пацієнтів з МЗС. Задишку діагностовано в 11 пацієнтів: експіраторну – у двох (6,1 %), змішаного характеру – у дев'яти (27,3 %).

2. Запальні маркери були підвищеними при поступленні і мали тенденцію до зростання в динаміці. Серединне значення СРП на момент госпіталізації та на третій день лікування становило 80,00 мг/л [24,00; 98,00]; 96,00 мг/л [48,00; 192,00], відповідно. Серединне значення прокальцитоніну в ці періоди дослідження мало таку динаміку: 2,39 нг/мл [0,53; 7,90] та 0,70 нг/мл [0,15; 3,46], відповідно. ІЛ-6 також виявлявся підвищеним на момент госпіталізації з його серединним значенням 12,65 пг/мл [9,45; 18,88], в подальшому цей показник був від'ємний. Проаналізувавши загальний аналіз крові пацієнтів з МЗС, встановлено, що найвищий серединний рівень лейкоцитів $23,64 \times 10^9/\text{л}$ [11,79; 39,00] виявлено у пацієнтів третьої вікової групи, ($p < 0,05$). Нейтрофільні гранулоцити були найвищими у пацієнтів другої вікової групи при госпіталізації з серединним значенням 87,50 % [81,75; 92,25], ($p < 0,05$).

3. При вивченні гемостазу, серединне значення Д-димеру в усіх пацієнтів на момент госпіталізації становило 4083,50 нгФЕОд/мл [2772,75; 5493,00], з найвищим його значенням 4661,00 нгФЕОд/мл [3026,55; 5610,50] у дітей третьої вікової групи на момент госпіталізації. У контексті дослідження Д-димеру виявлено статистично значущі прямі кореляційні зв'язки з прокальцитоніном на момент госпіталізації та на третій день: ($r = +0,56$; $p < 0,05$) та ($r = +0,77$; $p < 0,05$), відповідно; та сильний прямий ($r = +0,97$; $p < 0,05$) з INR при поступленні.

Серединне значення тромбоцитів як при госпіталізації, так і на третій день лікування було найнижчим у пацієнтів віком від 5 до 10 років і становило $102,00 \times 10^9/\text{л}$ [89,75; 111,50] та $123 \times 10^9/\text{л}$ [68,25; 146,25], ($p < 0,05$).

4. Дослідження вказує, що серединне значення альбуміну на третю добу лікування в усіх дітей з МЗС знизилося майже вдвічі і становило 35,00 г/л [23,50; 39,70] (при середньому значенні 33,23 г/л), одним з клінічних проявів є набряки: кистей рук – 16 осіб (48,5 %), стоп – у шести (18,2 %) та поширений по тілу – у трьох (9,1 %) пацієнтів. Водночас, базуючись на даних УЗД у 15,15 % пацієнтів виявлено ознаки полісерозиту: рідина в черевній (45,45 %) та плевральній (15,15 %) порожнинах і в перикарді (12,12 %).

5. Серед усіх пацієнтів з МЗС серединне значення IgG-S до SARS-CoV-2 становило 8,87 [6,80; 9,68]. Проте, найвищим цей показник виявився у другій віковій групі і становив 9,15 [8,91; 10,42], а найнижчим – 8,42 [6,58; 9,61] був у третій групі. В динаміці через три місяці серединне значення IgG-S до SARS-CoV-2 зросло до 9,19 [7,37; 9,28] у пацієнтів усієї досліджуваної групи.

6. Результати рентгенологічного обстеження показали, що у 51,5% пацієнтів діагностовано пневмонію різної локалізації. Двобічна нижньочасткова пневмонія виявлена у 18,8%, правобічна вогнищева пневмонія у 9,4%, а двобічна вогнищева пневмонія у 6,3% випадків. Також були

зафіксовані випадки правобічного пневмотораксу у 3,1% дітей та тимомегалії у 12,5%. Найчастіше випадки пневмонії реєстрували серед дітей другої вікової групи – 57,14 %. Аналізуючи результати дослідження ЕХО-КГ, діагностовано, що фракція викиду в середньому становила $63,9 \% \pm 1,2$ (min-37; max-72), низьку – 54-56 % виявлено у трьох пацієнтів; гідроперикард – у чотирьох осіб (12,12 %); у 20 дітей (60,61 %) – лінійне розширення коронарних судин від 0,3 см до 1,4 см.

7. У ході дослідження, застосувавши метод логістичної регресії, виокремлено 7 факторів: Д-димер, феритин, прокальцитонін, тромбоцити, СРП, протромбіновий індекс, альбумін, які з великою вірогідністю впливають на ураження коронарних судин у госпіталізованих дітей з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2. Рівні тромбоцитів та альбуміну мають зворотний зв'язок, п'ять інших факторів мають провокуючий вплив.

$$C = 0,0008 * X1 + 0,0001 * X2 + 0,0011 * X3 - 0,0145 * X4 + 0,0061 * X5 + \\ + 0,3391 * X6 - 0,2411 * X7 - 22,4705$$

АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Коронавірусна хвороба 2019 (COVID-19) стала глобальною проблемою наприкінці 2019 року. Ідентифіковано новий вірус SARS-CoV-2, який став причиною розвитку пандемії 11 березня 2020 року (15).

Основний механізм передачі – повітряно-краплинний через аерозолі²⁴⁹.

Для інфікування клітин вірус використовує рецептори ACE2 [50], нейтропілін-1 (NRP1)²⁵⁰ та TMPRSS2 — мембрано-зв'язуючу серинову протеазу²⁵¹. Wrapp D et al встановили, що протеїн S є головним чинником у процесі інфікування вірусом клітин людини²⁵².

В легенях SARS-CoV-2 уражає переважно пневмоцити та макрофаги, активуючи їх. Швидка реплікація вірусу в легенях може спричинити апоптоз клітин (5), одночасне зниження експресії ACE2 змінює ренін-ангіотензинову систему з підвищенням ангіотензину-2, що збільшує запалення та проникність судин, викликаючи набряк легень. Гіперзапальний синдром, який виникає в результаті ініціювання тригерів неконтрольованого запалення або синдром бурі цитокінів²⁵³ та недостатність легеневого сурфактанту є найбільш важливими ланками у розвитку гострого респіраторного дистрес-синдрому (ГРДС), пневмонії^{254,255}. Превалюючими клінічними ознаками пневмонії, спричиненої SARS-CoV-2 у дітей, є тахіпное та лихоманка, водночас кашель не є одним із провідних симптомів пневмонії при COVID-19²⁵⁶.

²⁴⁹ M. Hoffmann et al., "SARS-CoV-2 Cell Entry Depends on ACE2 and TMPRSS2 and Is Blocked by a Clinically Proven Protease Inhibitor," *Cell*, vol. 181, no. 2, pp. 271-280.e8, 2020, doi: 10.1016/j.cell.2020.02.052.

²⁵⁰ L. Cantuti-Castelvetri et al., "Neuropilin-1 facilitates SARS-CoV-2 cell entry and infectivity," *Science* (80-.), vol. 370, no. 6518, pp. 856-860, 2020, doi: 10.1126/science.abd2985.

²⁵¹ M. Hoffmann et al., "SARS-CoV-2 Cell Entry Depends on ACE2 and TMPRSS2 and Is Blocked by a Clinically Proven Protease Inhibitor," *Cell*, vol. 181, no. 2, pp. 271-280.e8, 2020, doi: 10.1016/j.cell.2020.02.052.

²⁵² D. Wrapp et al., "Cryo-EM structure of the 2019-nCoV spike in the prefusion conformation," *Science* (80-.), vol. 367, no. 6483, pp. 1260-1263, 2020, doi: 10.1126/science.aba0902.

²⁵³ C. Crayne and R. Q. Cron, "Pediatric macrophage activation syndrome, recognizing the tip of the Iceberg," *Eur. J. Rheumatol.*, vol. 7, no. 1, pp. 13-20, Feb. 2020, doi: 10.5152/eurjrheum.2019.19150.

²⁵⁴ C. J. Castillo L., "Secondary hemophagocytic lymphohistiocytosis and severe sepsis/systemic inflammatory response syndrome/multiorgan dysfunction syndrome/macrophage activation syndrome share common intermediate phenotypes on a spectrum of inflammation.," *Pediatr Crit Care Med.*, vol. 3, no. 3, pp. 387-392., 2009, doi: 10.1097/PCC.0b013e3181a1ae08.

²⁵⁵ P. Conti et al., "Induction of pro-inflammatory cytokines (IL-1 and IL-6) and lung inflammation by Coronavirus-19 (COVI-19 or SARS-CoV-2): anti-inflammatory strategies.," *J. Biol. Regul. Homeost. Agents*, vol. 34, no. 2, pp. 327-331, 2020, doi: 10.23812/CONTI-E.

²⁵⁶ W. Xia, J. Shao, Y. Guo, X. Peng, Z. Li, and D. Hu, "Clinical and CT features in pediatric patients with COVID-19 infection: Different points from adults," *Pediatr. Pulmonol.*, vol. 55, no. 5, pp. 1169-1174, 2020, doi: 10.1002/ppul.24718.

Тромботичний розлад згортання частіше зустрічається у важких випадках. Д-димер є одним з важливих маркерів згортання крові і має більшу діагностичну цінність для встановлення її ступеня тяжкості²⁵⁷.

Відомо, що вірус уражає всі вікові групи^{258,259}. Клінічний спектр дитячого COVID-19 дуже широкий: від безсимптомного²⁶⁰ до критично важкого захворювання²⁶¹. Серед обстежених дітей з SARS-CoV-2, відзначаються безсимптомні, легкі, середньо-тяжкі, тяжкі та критично-тяжкі форми перебігу COVID-19, що складають 29,5 %, 56,4 %, 12,9 %, 1,2 % і 0 %, відповідно²⁶². У різні епідемічні періоди від 3,5 % до 7 % дітей потребували госпіталізації (84), у відділення інтенсивної терапії – 0,8 % і смертність серед них становила близько 0,1 % (83). Діагностика хвороби базується на виявленні РНК або її фрагментів SARS-CoV-2 методом ПЛР²⁶³ та IgA, IgM та IgG до SARS-CoV-2 методом ІФА^{264,265,266}.

Одним з найтяжчих віддалених наслідків SARS-CoV2 є МЗС. Середній інтервал між початком симптомів COVID-19 та початком МЗС становив 25 днів (від 6 до 51 дня)²⁶⁷. МЗС характеризується полісистемністю ураження, одним з провідних є ушкодження серцево-судинної системи.

Реалізація передбачення тяжкого інфекційного процесу у дітей можлива при вивченні рівнів прозапальних і протизапальних цитокінів, прокальцитоніну, СРП та тропоніну²⁶⁸. В наукових дослідженнях зазначено, що показники феритину, Д-димеру, фібриногену та коагулограми є маркерами тяжкості^{269,270}.

Проведений аналіз специфічних антитіл різних класів дає розуміння тяжкості, тривалості інфекційності та постінфекційного процесів²⁷¹.

Проведення комплексних клінічних та лабораторних досліджень здійснювались у педіатричних відділеннях двох лікувальних закладів у Львові впродовж 2020-2021 рр.

²⁵⁷ T. Iba, J. H. Levy, M. Levi, and J. Thachil, "Coagulopathy in COVID-19," *J. Thromb. Haemost.*, vol. 18, no. 9, pp. 2103–2109, 2020, doi: 10.1111/jth.14975.

²⁵⁸ S. Bialek et al., "Severe Outcomes Among Patients with Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) — United States, February 12–March 16, 2020," *MMWR. Morb. Mortal. Wkly. Rep.*, vol. 69, no. 12, pp. 343–346, 2020, doi: 10.15585/mmwr.mm6912e2.

²⁵⁹ R. M. Viner et al., "Susceptibility to SARS-CoV-2 Infection among Children and Adolescents Compared with Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis," *JAMA Pediatr.*, vol. 175, no. 2, pp. 143–156, 2021, doi: 10.1001/jamapediatrics.2020.4573.

²⁶⁰ R. Mungmunpuntantip and V. Wiwanitkit, "Chest computed tomography in children with COVID-19," *Pediatr. Radiol.*, vol. 50, no. 7, p. 1018, 2020, doi: 10.1007/s00247-020-04676-3.

²⁶¹ D. Bixler et al., "SARS-CoV-2–Associated Deaths Among Persons Aged <21 Years — United States, February 12–July 31, 2020," *MMWR. Morb. Mortal. Wkly. Rep.*, vol. 69, no. 37, pp. 1324–1329, 2020, doi: 10.15585/mmwr.mm6937e4.

²⁶² E. Berksoy et al., "Clinical and laboratory characteristics of children with SARS-CoV-2 infection," *Pediatr. Pulmonol.*, vol. 56, no. 12, pp. 3674–3681, 2021, doi: 10.1002/ppul.25654.

²⁶³ World Health Organization Europe (WHO Europe), "Coronavirus disease (COVID-19) technical guidance: Laboratory testing for 2019-nCoV in humans," <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/technical-guidance/laboratory-guidance>, 2020.

²⁶⁴ IgM/IgG and antibody kinetics," *Clin. Chem. Lab. Med.*, vol. 58, no. 7, pp. 1081–1088, 2020, doi: 10.1515/cclm-2020-0443.

²⁶⁵ S. P. Weisberg et al., "Distinct antibody responses to SARS-CoV-2 in children and adults across the COVID-19 clinical spectrum," *Nat. Immunol.*, vol. 22, no. 1, pp. 25–31, Jan. 2021, doi: 10.1038/s41590-020-00826-9.

²⁶⁶ J. S. M. Peiris, "Coronaviruses," in *Medical Microbiology*, Elsevier, 2012, pp. 587–593.

²⁶⁷ L. R. Feldstein et al., "Multisystem Inflammatory Syndrome in U.S. Children and Adolescents," *N. Engl. J. Med.*, vol. 383, no. 4, pp. 334–346, 2020, doi: 10.1056/nejmoa2021680.

²⁶⁸ E. Whittaker et al., "Clinical Characteristics of 58 Children with a Pediatric Inflammatory Multisystem Syndrome Temporally Associated with SARS-CoV-2," *JAMA - J. Am. Med. Assoc.*, vol. 324, no. 3, pp. 259–269, 2020, doi: 10.1001/jama.2020.10369.

²⁶⁹ E. Whittaker et al., "Clinical Characteristics of 58 Children with a Pediatric Inflammatory Multisystem Syndrome Temporally Associated with SARS-CoV-2," *JAMA - J. Am. Med. Assoc.*, vol. 324, no. 3, pp. 259–269, 2020, doi: 10.1001/jama.2020.10369.

²⁷⁰ M. F. B. Pereira et al., "Severe clinical spectrum with high mortality in pediatric patients with covid-19 and multisystem inflammatory syndrome," *Clinics*, vol. 75, pp. 1–7, 2020, doi: 10.6061/clinics/2020/e2209.

²⁷¹ I. Quinti, E. P. Mortari, A. Fernandez Salinas, C. Milito, and R. Carsetti, "IgA Antibodies and IgA Deficiency in SARS-CoV-2 Infection," *Front. Cell. Infect. Microbiol.*, vol. 11, no. April, pp. 1–5, 2021, doi: 10.3389/fcimb.2021.655896.

У дослідження взяли участь 143 дитини віком від 1 до 18 років, серед яких 110 дітей (76,92 %) становили пацієнти з COVID-19, середній вік пацієнтів – 9,20 роки [5,13; 14, 00] та 33 (23,07 %) – особи з МЗС, середній вік яких складав 10,40 років [7,00; 14,00].

Діагноз COVID-19 базувався на клінічних ознаках респіраторної інфекції та виявленні РНК SARS-CoV-2 методом ПЛР з матеріалу мазків зібраних з носоглотки, яке проводилося у Львівському обласному центрі контролю та профілактики хвороб МОЗ України.

У ході дослідження, базуючись на клінічних ознаках, відповідно до критеріїв тяжкості SARS-CoV-2, розроблених Carlotti APCP et al., середньо-тяжкий перебіг COVID-19 діагностовано у 80 пацієнтів (72,73 %), середній вік яких становив 8,00 років [4,98; 13,08]; тяжка форма – у 30 пацієнтів (27,27 %), середній вік яких становив 12,05 років [7,65; 16,00], ($p < 0,05$). Слабкий позитивний зв'язок між віком дитини та ступенем тяжкості захворювання ($r = +0,224$; $p < 0,05$) може вказувати на тенденцію до більш тяжкого перебігу у старших вікових групах. За даними науковців з США, тяжкий перебіг захворювання частіше виявлено у підлітків, хоча тяжкість перебігу COVID-19 у різних вікових групах залежить від штаму SARS-CoV-2²⁷².

У групі спостереження виявлено такі коморбідні стани: ожиріння у 5,45 % дітей, цукровий діабет першого типу виявлено у 4,55 %, бронхіальна астма, залізодефіцитна анемія та atopічний дерматит – у 2,73 %. 16,67 % пацієнтів віком старше 13 років, які хворіли на тяжку форму COVID-19 мали ожиріння. Водночас цукровий діабет був фоною патологією у 5 % осіб з середньо-тяжким COVID-19. Ожиріння, найчастіше з усіх коморбідних станів, є причиною збільшення ризику тяжкого перебігу хвороби, переважно у дітей старших п'яти років [200].

Середня тривалість COVID-19 на догоспітальному етапі становила 4,00 дні [3,00; 7,00]. Госпіталізація була обумовлена рядом симптомів, що свідчать про різноманітні клінічні прояви захворювання у пацієнтів. Зокрема, основними причинами госпіталізації дітей були підвищена температура тіла (95,5 %), загальна слабкість (91,8 %) та зниження апетиту (80,0 %). Інші симптоми включали біль голови (22,7 %), біль у горлі (19,1 %), нежить (6,4 %), біль у м'язах (3,6 %), сухий (50,0 %) і вологий (4,5 %) кашель, відчуття серцебиття, пітливість та аносмію (5,5 %), агевзію (4,5 %), сонливість (3,6 %), втрату свідомості, страх, неспокій, гіперестезію (0,9 %), та висип (1,8 %). Як зазначено в наукових дослідженнях, у всіх вікових групах найчастішою клінічною ознакою була лихоманка. Аносмія та агевзія, хоча і були типовими симптомами COVID-19, рідко спостерігались у дітей. Варіативний характер симптомів вказує на широкий спектр проявів COVID-19 у досліджуваних пацієнтів, які потребують моніторингу та ретельного вивчення різноманітних проявів коронавірусної інфекції у дітей для ефективної діагностики та лікування. Без проведення специфічних лабораторних досліджень підтвердження діагнозу є неможливим²⁷³.

У пацієнтів на момент госпіталізації виокремлено такі основні синдроми: інтоксикаційний; синдром ураження респіраторного тракту; диспепсичний та рідше – синдром екзантеми.

На момент госпіталізації у 41 (37,3 %) пацієнта з COVID-19 виявлено фебрильну температуру тіла (38,1 до 39 °C); гіпертермія (39,1 - 40,1°C) спостерігалась у 31 пацієнта (28,2 %); таку ж частку становили діти з субфебрильною температурою тіла (37,1 - 38,0 °C); гіперпірексія (> 40,1°C) діагностована у двох пацієнтів. Проте у п'яти осіб (4,5 %) температура тіла була нормальною.

²⁷² L. Stopyra et al., "The Age-Related Course of COVID-19 in Pediatric Patients—1405 Cases in a Single Center," J. Clin. Med., vol. 11, no. 24, 2022, doi: 10.3390/jcm11247347.

²⁷³ L. Stopyra et al., "The Age-Related Course of COVID-19 in Pediatric Patients—1405 Cases in a Single Center," J. Clin. Med., vol. 11, no. 24, 2022, doi: 10.3390/jcm11247347.

Катаральні ознаки не були вираженими, біль у горлі був одною з поширених скарг, яка частіше спостерігалася у пацієнтів з тяжкою формою хвороби (23,3 %). Сухий та вологий кашель турбував більше ніж половину пацієнтів з COVID-19: при тяжкому його перебігу – 20 осіб (66,7 %); при середньо-тяжкому – 40 (50,1 %).

У 21 дитини (19,1 %) виявлено задишку змішаного характеру та експіраторну – у 10 (9,1 %). Задишку змішаного характеру діагностовано у чверті (12 (24,5 %)) пацієнтів третьої вікової групи; у чотирьох дітей (12,1 %) – другої групи; у п'яти (17,9 %) – першої вікової групи. Задишка турбувала усіх пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19: змішана – 21 (70,0 %), експіраторна – дев'ять (30,0 %), на відміну від пацієнтів з середньо-тяжкою формою – експіраторну задишку виявлено тільки в одного пацієнта (1,3 %), ($p < 0,05$)²⁷⁴.

При перевірці насиченості тканин киснем усім пацієнтам з COVID-19 виявлено, що середнє значення SpO₂ при диханні кімнатним повітрям становило $94,90 \pm 4,93$ % (min-69, max-99). У 29 пацієнтів, які потребували оксигенотерапії, середнє значення SpO₂ становило $86,84 \pm 1,05$ % (min-69 та max-93). При оксигенотерапії середнє значення SpO₂ зросло до $96,83 \pm 2,44$ % (23 кисень подавався через лицеву маску; шість перебували на ШВЛ). У двох дітей, у яких спостерігалася критична гіпоксемія, яку не вдалося подолати за допомогою традиційної респіраторної підтримки, було з успіхом використано ЕКМО. Загрозливі для життя стани, пов'язані з COVID-19, у дітей зустрічаються набагато рідше, ніж у дорослих^{275,276}.

Одним із проявів COVID-19 у госпіталізованих дітей був диспепсичний синдром, який проявлявся: нудотою – у 2 пацієнтів (1,8 %), діареєю водянистого характеру від 1 до 3 разів – у 10 (9,1 %), частим водянистим стільцем (> 3 до 10 разів) – у двох (1,8 %); гемоколіт розвинувся в однієї дитини (0,9 %), біль в животі розлитого характеру турбував 12 осіб (10,9 %). Аналізуючи скарги з боку ШКТ у пацієнтів з COVID-19 третьої вікової групи, статистично достовірними є наявність водянистої діареї 1-3 рази, болю у животі розлитого характеру та болю навколо пупка ($p < 0,05$). Діарейний синдром у відсотковому співвідношенні переважав у старших дітей, хоча зустрічався у всіх вікових групах²⁷⁷.

Провівши аналіз показників загального аналізу крові, виявлено що значення лейкоцитів коливались від $2,07 \times 10^9$ /л до $16,96 \times 10^9$ /л та від $1,84 \times 10^9$ /л до $18,95 \times 10^9$ /л при середньо-тяжких та тяжких формах хвороби відповідно. Статистично недостовірними виявились серединні значення показників лейкоцитів, які становили $6,16 \times 10^9$ /л [4,63; 7,66] та $5,35 \times 10^9$ /л [3,40; 7,90] при середньо-тяжкій та тяжкій формах відповідно ($p > 0,05$)²⁷⁸.

Під час аналізу виявлено статистично значущі відмінності у значеннях нейтрофільних гранулоцитів у різних вікових групах пацієнтів. Зокрема, у пацієнтів віком до 5 років серединне значення нейтрофільних гранулоцитів становило 47,00% [39,50; 63,20]; у дітей віком $\geq 5 < 10$ років середнє значення нейтрофільних гранулоцитів було $57,32 \pm 14,09$ %; у пацієнтів віком $\geq 10 < 18$ років – $65,20 \pm 15,52$ %, ($p < 0,05$). Середні/серединні показники лімфоцитів у пацієнтів різних

²⁷⁴ A. P. de C. Panzeri Carloti, W. B. de Carvalho, C. Johnston, I. S. Rodriguez, and A. F. Delgado, "Covid-19 diagnostic and management protocol for pediatric patients," Clinics, vol. 75, pp. 1–5, 2020, doi: 10.6061/CLINICS/2020/E1894.

²⁷⁵ L. Stopyra et al., "The Age-Related Course of COVID-19 in Pediatric Patients—1405 Cases in a Single Center," J. Clin. Med., vol. 11, no. 24, 2022, doi: 10.3390/jcm11247347.

²⁷⁶ et al. Zabrocki LA, Brogan TV, Statler KD, "Extracorporeal membrane oxygenation for pediatric respiratory failure: survival and predictors of mortality," Crit Care Med, vol. 39(2);, pp. 364–70. doi: 10.1097/CCM.0b013e3181fb7b35., 2011.

²⁷⁷ L. Stopyra et al., "The Age-Related Course of COVID-19 in Pediatric Patients—1405 Cases in a Single Center," J. Clin. Med., vol. 11, no. 24, 2022, doi: 10.3390/jcm11247347.

²⁷⁸ E. Berksoy et al., "Clinical and laboratory characteristics of children with SARS-CoV-2 infection," Pediatr. Pulmonol., vol. 56, no. 12, pp. 3674–3681, 2021, doi: 10.1002/ppul.25654.

вікових групах теж були статистично достовірними: першої вікової групи – $47,04 \pm 19,52\%$; другої – $41,00\%$ [30,00; 45,20] та третьої – $30,00\%$ [20,00; 40,00], ($p < 0,05$).

При вивченні кількості тромбоцитів у загальному аналізі крові виявлено, що при зростанні віку пацієнта цей показник знижується, що підтверджено негативним кореляційним зв'язком, ($r = -0,30$; $p < 0,002$).

Вивчаючи показники маркерів запалення, встановлено, що середнє значення СРП в усіх пацієнтів з COVID-19 при госпіталізації становило $6,00$ мг/л [4,00; 12,00]. Значення цього показника при середньо-тяжкій формі становило $6,00$ мг/л [4,00; 6,00] та при тяжкій – $12,00$ мг/л [6,00; 96,00] ($p < 0,05$). Середнє значення СРП у дітей різних вікових груп на момент госпіталізації було в межах норми, проте максимальний показник у всіх вікових групах був однаково високий – 192 мг/л ($p > 0,05$). Показник СРП має прямі кореляційні зв'язки середньої сили з рівнем фібриногену ($r = +0,34$; $p < 0,05$) та феритину ($r = +0,38$; $p < 0,05$). Слабкої сили прямий кореляційний зв'язок між СРП на момент госпіталізації та тяжкістю захворювання, ($r = +0,29$; $p < 0,05$), підкреслює його роль у характеристиці ступеня тяжкості хвороби у пацієнтів з COVID-19²⁷⁹.

Прокальцитонін є одним із ключових лабораторних маркерів запалення. Середнє значення якого в усіх пацієнтів з COVID-19 у день госпіталізації становило $0,06$ нг/мл [0,05; 0,55]. Показник прокальцитоніну корелював з тяжкістю захворювання ($r = +0,51$; $p < 0,05$).

У пацієнтів з тяжким перебігом SARS-CoV-2 середнє його значення становило $0,42$ нг/мл [0,05; 1,34] та $0,05$ нг/мл [0,03; 0,06] – у дітей зі середньо-тяжким перебігом, ($p < 0,05$). У динаміці цей показник наростав і становив: $0,05$ нг/мл [0,04; 0,05] (при середньому значенні $0,05$ нг/мл) при середньо-тяжкому перебігу хвороби та при тяжкому – $0,44$ нг/мл [0,11; 7,18]. Серед досліджуваних пацієнтів у трьох вікових групах також спостерігалися відмінності: середнє значення цього показника на момент госпіталізації було найвищим у другій віковій групі і становило – $1,64$ нг/мл [0,85; 4,32], незначно нижче – $0,09$ нг/мл [0,05; 0,21] виявлено у пацієнтів першої вікової групи.

При госпіталізації виявлено кореляційні зв'язки між значеннями прокальцитоніну з показниками тромбоцитів і загального білка ($r = -0,49$; $p < 0,05$) та ($r = -0,47$; $p < 0,05$), відповідно. Рівень загального білка при поступленні дітей не корелював з тяжкістю перебігу COVID-19. Проте, вже на третю добу лікування виявлено значну обернену залежність між тяжкістю хвороби та загальним білком ($r = -0,71$; $p < 0,05$). Крім того, виявлено, що рівень альбуміну, визначений на третій день госпіталізації, зменшується зі зростанням показника прокальцитоніну ($r = -1,00$; $p < 0,0001$). Аналіз результатів лабораторних досліджень вказав на значний зв'язок між важкістю та віком, СРП, рівнями IL-6, IL-10, Д-димером²⁸⁰ та виявлені значні підвищення рівнів показників СРП, феритину і прокальцитонін у важких і критичних випадках²⁸¹.

Дослідження IL-6 проводилося у 53 пацієнтів з COVID-19. Середнє значення становило $1,20$ пг/мл [0,50; 7,00] (при середньому значенні $12,17$ пг/мл). У пацієнтів з середньо-тяжким перебігом хвороби середнє значення IL-6 становило $1,20$ пг/мл [0,55; 2,15]; з тяжким перебігом – $7,50$ пг/мл [0,65; 18,50], відповідно ($p < 0,05$). Нами встановлено, що середнє значення IL-6 при різному за тяжкістю перебігу хвороби в динаміці теж різнилися: при середньо-тяжкому – IL-6 був нижче референтних значень, тоді як при тяжкому COVID-19 становив $3,95$ пг/мл [1,97; 5,92].

²⁷⁹ A. Stasiak, E. Perdas, and E. Smolewska, "Risk factors of a severe course of pediatric multi-system inflammatory syndrome temporally associated with COVID-19," *Eur. J. Pediatr.*, vol. 181, no. 10, pp. 3733–3738, 2022, doi: 10.1007/s00431-022-04584-8.

²⁸⁰ G. Qian et al., "Reduced inflammatory responses to SARS-CoV-2 infection in children presenting to hospital with COVID-19 in China," *EClinicalMedicine*, vol. 34, p. 100831, 2021, doi: 10.1016/j.eclinm.2021.100831.

²⁸¹ D. Nizami, V. Raman, L. Paulose, K. Hazari, and A. Mallick, "Role of laboratory biomarkers in assessing the severity of COVID-19 disease. A cross-sectional study," *J. Fam. Med. Prim. Care*, vol. 10, no. 6, p. 2209, 2021, doi: 10.4103/jfmprc.jfmprc_145_21.

У вікових групах серединні значення рівня ІЛ-6 значно відрізнялися. Найвищим цей показник виявився у другій віковій групі і становив 1,85 пг/мл [1,35; 15,60]. У першій та третій вікових групах цей показник становив: 1,80 пг/мл [0,00; 7,00] та 1,15 пг/мл [0,70; 2,90], відповідно.

У 56 обстежуваних пацієнтів з різним перебігом COVID-19, ІЛ-2 як при первинному, так і при повторному дослідженні, був негативним. Отримані нами результати співпадають з науковими дослідженнями проведеними у Китаї²⁸².

У ході наукового дослідження у 61 пацієнта з різним перебігом COVID-19 вивчався рівень ІЛ-10 у крові, середнє значення якого становило $6,64 \pm 30,24$ пг/мл. У 47 пацієнтів зі середньо-тяжким перебігом COVID-19 середнє значення ІЛ-10 було $1,87 \pm 6,37$ пг/мл, та у 14 дітей з тяжким перебігом хвороби становило $22,64 \pm 60,97$ пг/мл, ($p < 0,05$).

У 15 пацієнтів першої вікової групи середнє значення ІЛ-10 з початком лікування становило $5,67 \pm 12,08$ пг/мл з мінімальним значенням – 0 пг/мл та максимальним – 35 пг/мл. Середнє значення ІЛ-10 у 17 пацієнтів другої вікової групи було нижчим і становило $3,53 \pm 7,91$ пг/мл (min-0; max-22). Найвищим виявилось середнє значення ІЛ-10 у 29 пацієнтів третьої вікової групи – $8,97 \pm 42,87$ пг/мл. Науковці відмітили значний зв'язок між важкістю хвороби і ІЛ-6 та ІЛ-10. Проте, порівнявши ці показники у пацієнтів з середньо-тяжкими та тяжкими/критичними формами, значних різниць не було помічено²⁸³.

Одним із ключових маркерів гемостазу при COVID-19 є Д-димер. Виявлення та моніторинг рівня Д-димеру відіграє важливу роль в оцінці тяжкості захворювання та передбачення його перебігу. У всіх пацієнтів з COVID-19 при поступленні середнє значення Д-димеру становило 733,00 нгФЕОд/мл [231,00; 1246,00] (при середньому його значенні 1462,11 мкг ФЕО/мл). Статистично достовірними виявились результати серединного значення показника Д-димеру на момент госпіталізації залежно від тяжкості перебігу: 791,00 нгФЕОд/мл [540,00; 1844,50] у пацієнтів з тяжким перебігом хвороби та 368,00 нгФЕОд/мл [149,25; 921,25] – у дітей з COVID-19 зі середньо-тяжким перебігом ($p < 0,05$). Рівень Д-димеру у пацієнтів з тяжким COVID-19 наростав у динаміці захворювання і середнє його значення на третій день стаціонарного лікування становило 1206,00 нгФЕОд/мл [980,00; 2855,00]. Водночас значення Д-димеру у пацієнтів з середньо-тяжким COVID-19 знизився до 425,00 нгФЕОд/мл [397,00; 812,50], ($p > 0,05$). Отримані нами показники є близькими до результатів інших дослідників, які підтверджують вищі значення Д-димеру у обстежених пацієнтів із тяжким перебігом COVID-19²⁸⁴.

Аналізуючи рівень Д-димеру залежно від віку пацієнта, нами встановлено, що на момент поступлення до лікарні, найвище його середнє значення у пацієнтів з COVID-19 другої вікової групи становило 808,50 нгФЕОд/мл [173,00; 1437,75].

Вивчаючи рівень феритину у 54 пацієнтів COVID-19 при поступленні, середнє його значення становило 63,30 нг/мл [37,15; 207,50]. У динаміці цей показник нарів до 203,00 нг/мл [74,20; 390,00]. У пацієнтів з тяжкою формою COVID-19 середнє значення феритину було 195,00 нг/мл [49,75; 344,00] ($p > 0,05$).

З'ясовуючи кореляційні зв'язки виявлено середньої сили позитивний кореляційний зв'язок між Д-димером та феритином ($r = +0,47$; $p < 0,0004$). Схожий зв'язок спостерігався між показниками

²⁸² G. Qian et al., "Reduced inflammatory responses to SARS-CoV-2 infection in children presenting to hospital with COVID-19 in China," *EClinicalMedicine*, vol. 34, p. 100831, 2021, doi: 10.1016/j.eclinm.2021.100831.

²⁸³ G. Qian et al., "Reduced inflammatory responses to SARS-CoV-2 infection in children presenting to hospital with COVID-19 in China," *EClinicalMedicine*, vol. 34, p. 100831, 2021, doi: 10.1016/j.eclinm.2021.100831.

²⁸⁴ G. Qian et al., "Reduced inflammatory responses to SARS-CoV-2 infection in children presenting to hospital with COVID-19 in China," *EClinicalMedicine*, vol. 34, p. 100831, 2021, doi: 10.1016/j.eclinm.2021.100831.

Д-димеру та прокальцитоніну при госпіталізації ($r = +0,49$; $p < 0,05$). Виявлено також прямий середньої сили зв'язок між показником Д-димеру та запальними маркерами ШОЕ та СРП: ($r = +0,35$; $p < 0,05$) та ($r = +0,33$; $p < 0,05$), відповідно. Тяжкість перебігу захворювання корелювала з показником Д-димеру при госпіталізації ($r = +0,35$; $p < 0,05$). Підвищення Д-димеру в сироватці крові є одним з маркерів тяжкого COVID-19, ризику ураження легень та розвитку ускладнень²⁸⁵.

Встановлено значущий прямий позитивний зв'язок між тяжкістю та тромбінним часом при госпіталізації ($r = +0,86$; $p < 0,05$).

Кореляційні взаємозв'язки між цими показниками свідчать про дискоагуляційні порушення, запалення та метаболізму у дітей із COVID-19 і є важливими аспектами тяжкості перебігу захворювання. У проведених дослідженнях була виявлена значна асоціація між тяжкістю захворювання COVID-19 та такими факторами, як вік, СРП, рівні IL-6, IL-10 та Д-димеру^{286,287}.

Серологічні дослідження дозволяють вивчати імунну відповідь на SARS-CoV-2, визначити сероконверсію та характеризувати перебіг COVID-19 і є важливими для епідеміологічного процесу та його корекції.

Аналізуючи результати IgM до SARS-CoV-2 на першому та другому тижнях досліджень виявлено, що середні значення цих показників були нижчі від референтних значень і становили 0,24 [0,14; 1,39] (min-0,03, max-14,63) та 0,49 [0,30; 2,87] (min-0,07, max-14,63), відповідно.

Зростання серединного значення IgM до SARS-CoV-2 у 2,5 рази діагностовано в період з 15 до 30 дня після початку симптомів хвороби і становило 2,50 [0,56; 6,21] (min-0,07, max-12,66). У період з другого до третього місяців виявлено чітке зниження серединного значення IgM до SARS-CoV-2 до 0,52 [0,19; 0,76], що є в межах порогового референтного значення. В обстежених дітей після третього місяця серединне значення IgM до SARS-CoV-2 становило 0,05 [0,02; 0,09] (min-0,01, max-0,37), що є свідченням завершення гострого процесу захворювання.

У ході дослідження встановлено, що серединне значення IgM до SARS-CoV-2 у пацієнтів з тяжким перебігом з першого до сьомого дня становило 1,39 [1,36; 4,07] (min-0,11, max-14,63). Цей показник корелює з тяжкістю хвороби ($r = +0,310$; $p < 0,0054$). Водночас IgM у дітей з середньо-тяжким перебігом був суттєво нижчим і становив 0,22 [0,14; 0,58] (min-0,03, max-8,49) ($p < 0,05$).

Серединні значення IgM до SARS-CoV-2, досліджені у періоди з 8 по 14 день та з 15 до 30 дня від початку клінічних проявів у дітей з різним ступенем тяжкості COVID-19 продемонстрували таку динаміку: у дітей з тяжким перебігом хвороби серединні значення IgM зростали до 2,77 [0,36; 3,23] (min-0,073, max-6,79) в період з 8 по 14 день ($r = +0,143$; $p > 0,05$) і до 4,42 [2,08; 6,38] з 15 до 30 дня. У той же час у дітей з середньо-тяжким захворюванням вже в періоді з 8 по 14 день хвороби спостерігалось значення нижче референтних значень – 0,41 [0,27; 2,73] (min-0,073, max-12,66) ($p > 0,05$). Andrea Padoan et al. у когортному дослідженні встановили, що збільшення IgM і IgG до SARS-CoV-2 виявлено майже у всіх пацієнтів через 5 днів після появи симптомів та у 88 % пацієнтів IgM і в 100 % осіб IgG були найвищим на 12 день хвороби²⁸⁸. Подібні результати отримали дослідник з Італії та Німеччини, виявивши, що анти-SARS-CoV-2 IgG-N були низькими протягом 7 днів після

²⁸⁵ D. Nizami, V. Raman, L. Paulose, K. Hazari, and A. Mallick, "Role of laboratory biomarkers in assessing the severity of COVID-19 disease. A cross-sectional study," J. Fam. Med. Prim. Care, vol. 10, no. 6, p. 2209, 2021, doi: 10.4103/jfmpc.jfmpc_145_21.

²⁸⁶ G. Qian et al., "Reduced inflammatory responses to SARS-CoV-2 infection in children presenting to hospital with COVID-19 in China," EClinicalMedicine, vol. 34, p. 100831, 2021, doi: 10.1016/j.eclim.2021.100831.

²⁸⁷ D. Nizami, V. Raman, L. Paulose, K. Hazari, and A. Mallick, "Role of laboratory biomarkers in assessing the severity of COVID-19 disease. A cross-sectional study," J. Fam. Med. Prim. Care, vol. 10, no. 6, p. 2209, 2021, doi: 10.4103/jfmpc.jfmpc_145_21.

²⁸⁸ A. Padoan et al., "Analytical performances of a chemiluminescence immunoassay for SARS-CoV-2 IgM/IgG and antibody kinetics," Clin. Chem. Lab. Med., vol. 58, no. 7, pp. 1081–1088, 2020, doi: 10.1515/cclm-2020-0443.

початку, але через 14–28 днів після початку появи симптомів вони зросли у 100 % пацієнтів. Рівень IgM досяг піку на 10-12 день і значно знизився на 18 день²⁸⁹.

Слід зазначити, що сироваткові IgM 1 демонструють прямий середньої сили кореляційний зв'язок з віком пацієнтів ($r = +0,31$; $p < 0,05$), що є свідченням того, що із збільшенням віку дітей спостерігається зростання рівня IgM 1. Також встановлений позитивний кореляційний зв'язок між віком дитини та рівнем IgA 2 ($r = +0,57$; $p > 0,05$). Дані нашої роботи узгоджуються з результатами досліджень, де було відзначено значно вищі рівні IgA, IgM та IgG, у старших дітей²⁹⁰. Вироблення специфічних для SARS-CoV-2 IgM є тимчасовим і призводить до зміни ізотипу на IgA та IgG²⁹¹.

Середнє значення IgA до SARS-CoV-2 у різні періоди дослідження (з першого тижня до двох місяців) було негативним, проте максимальний показник виявлено уже на першому тижні хвороби, який становив 3,9 і до 30 дня від початку захворювання нарів до 6,35. У ранній специфічній гуморальній відповіді SARS-CoV-2 домінує поява IgA, які значною мірою сприяють нейтралізації вірусу²⁹². IgA у сироватці крові може швидко з'являтися, досягаючи піку на третьому тижні захворювання²⁹³ та знижуватися на 28 день²⁹⁴.

IgA до SARS-CoV-2 з'являються з другого тижня хвороби у пацієнтів з тяжкою формою хвороби і становлять 1,48 [0,52; 1,82], тоді як у пацієнтів з середньо-тяжкою формою захворювання рівень цього показника не перевищує норми ($p < 0,05$). Тяжкий перебіг захворювання корелює з рівнями IgA, демонструючи кореляційні зв'язки: IgA1 ($r = +0,310$; $p < 0,0054$) та IgA2 (8-14 день) ($r = +0,79$; $p < 0,05$). У наукових дослідженнях, проведених у Цюріху, пацієнти з тяжким перебігом COVID-19 продемонстрували значне підвищення титрів специфічних для SARS-CoV-2 сироваткових IgA та IgG на 12-14 день після появи симптомів. Системне вироблення антитіл проти SARS-CoV-2 розвивається у пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19, з дуже високими титрами IgA у пацієнтів з ГРДС²⁹⁵. Високі сироваткові титри IgA, корелювали з тяжким перебігом SARS-CoV-2 (111).

Середньої сили прямий кореляційний зв'язок між IgA1 та наступними показниками вказує на можливий вплив на систему згортання крові: Д-димером 1 ($r = +0,38$; $p < 0,05$), фібриногеном 1 ($r = +0,39$; $p < 0,05$), фібриногеном 3 ($r = +0,81$; $p < 0,05$) та з феритином 1 ($r = +0,38$; $p < 0,05$).

Рання поява та тривала наявність IgG-N- та IgG-S до SARS-CoV-2 у крові спостерігається в усіх пацієнтів. Проте середнє значення IgG-S є вищим з другого тижня дослідження, з найвищим його показником 9,40 [7,80; 10,60] (min-6,20, max-11,80) у період з 31 до 90 дня дослідження. При тяжких формах хвороби у період дослідження від трьох до шести місяців середнє значення IgG-S SARS-CoV-2 становило 7,91 [7,90; 8,97] (min-6,98, max-9,88) і було незначно вищим ($p > 0,05$), ніж у пацієнтів зі середньо-тяжким перебігом хвороби – 6,79 [6,11; 8,49] (min-0,88, max-9,15) у цей же період. На відміну від середнього значення IgG-S, показник IgG-N виявився втричі нижчим.

²⁸⁹ A. Padoan et al., "IgA-Ab response to spike glycoprotein of SARS-CoV-2 in patients with COVID-19: A longitudinal study," Clin. Chim. Acta, vol. 507, no. January, pp. 164–166, 2020, doi: 10.1016/j.cca.2020.04.026.

²⁹⁰ G. Qian et al., "Reduced inflammatory responses to SARS-CoV-2 infection in children presenting to hospital with COVID-19 in China," EClinicalMedicine, vol. 34, p. 100831, 2021, doi: 10.1016/j.eclim.2021.100831.

²⁹¹ C. Cervia et al., "Systemic and mucosal antibody responses specific to SARS-CoV-2 during mild versus severe COVID-19," J. Allergy Clin. Immunol., vol. 147, no. 2, pp. 545–557.e9, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jaci.2020.10.040.

²⁹² S. P. Weisberg et al., "Distinct antibody responses to SARS-CoV-2 in children and adults across the COVID-19 clinical spectrum," Nat. Immunol., vol. 22, no. 1, pp. 25–31, Jan. 2021, doi: 10.1038/s41590-020-00826-9.

²⁹³ A. Padoan et al., "IgA-Ab response to spike glycoprotein of SARS-CoV-2 in patients with COVID-19: A longitudinal study," Clin. Chim. Acta, vol. 507, no. January, pp. 164–166, 2020, doi: 10.1016/j.cca.2020.04.026.

²⁹⁴ I. Quinti, E. P. Mortari, A. Fernandez Salinas, C. Milito, and R. Carsetti, "IgA Antibodies and IgA Deficiency in SARS-CoV-2 Infection," Front. Cell. Infect. Microbiol., vol. 11, no. April, pp. 1–5, 2021, doi: 10.3389/fcimb.2021.655896.

²⁹⁵ C. Cervia et al., "Systemic and mucosal antibody responses specific to SARS-CoV-2 during mild versus severe COVID-19," J. Allergy Clin. Immunol., vol. 147, no. 2, pp. 545–557.e9, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jaci.2020.10.040.

Тяжкість перебігу хвороби корелює з IgG-S2, що підтверджено середньої сили прямим кореляційним зв'язком ($r = +0,303$; $p < 0,05$).

Дані дослідження дають змогу припустити, що у формуванні пост інфекційної імунної відповіді, S-білок SARS-CoV-2 відіграє важливу роль, враховуючи тривалішу наявність IgG до S-білку. За даними Weisberg SP et al., спостерігалася значна негативна кореляція титрів анти-N IgG залежно від віку, причому молоді люди мали нижчі титри анти-N, ніж старші дорослі, водночас у пацієнтів педіатричної групи визначались низькі титри анти-N у всіх вікових групах. IgG-S до SARS-CoV-2 зростали з часом після появи клінічних ознак хвороби як у дітей, так і в дорослих²⁹⁶. Імунна відповідь у дітей зберігається протягом 12 місяців, але динамічно змінюється, посилюючи нейтралізацію вірусу та впливає на тривалість імунної пам'яті²⁹⁷.

У доступній літературі описано позитивні результати IgG до трьох місяців постінфекційного процесу²⁹⁸. Результати наших досліджень збігаються з даними Jacobsen EM et al. та Maniu I et al., які показують, що імунна відповідь у дітей зберігається протягом 6–12 місяців, проте динамічно змінюється з прогресуючою нейтралізацією, широтою та дозріванням пам'яті^{299,300}.

Одним з критеріїв тяжкості COVID-19 є ураження легень. Серед усіх пацієнтів пневмонію діагностовано у 46 осіб (41,82 %). Правобічна вогнищева пневмонія виявлена у 18,7 % (95%ДІ: 11,6-27,6 %) і склала найбільшу частку.

Пневмонія асоційована з SARS-CoV-2 виявлена у 19 пацієнтів (63,33 %) з тяжким перебігом COVID-19. Правобічна вогнищева і двобічна полісегментарна пневмонії діагностовані у рівній кількості пацієнтів – у п'яти осіб – 17,9 % (95%ДІ: 6,7-34,9 %). Двобічна вогнищева, лівобічна вогнищева та лівобічна нижньочасточкова пневмонії діагностовані у трьох – 10,7 % (95%ДІ: 2,7-26,0 %), у трьох – 10,7 % (95%ДІ: 2,7-26,0 %) та однієї особи – 3,6 % (95%ДІ: 0,1-15,6 %), відповідно. Плеврит виявлено у двох – 2,2 % (95%ДІ: 0,3-6,8 %) пацієнтів. За даними Palabiyik F. et al. найчастішою локалізацією пневмонії при COVID-19 є нижні відділи однієї легені. Науковці стверджують, що у діагностиці слід віддавати перевагу рентгену грудної клітки, КТ використовувати за клінічними показами, у випадках рентгенологічних патологічних знахідок, які заслуговують на подальшу оцінку^{301,302}.

У пацієнтів з середньо-тяжким перебігом COVID-19 при рентгенологічному дослідженні діагностовано правобічну вогнищеву пневмонію у 12 осіб (19,0 %) (95%ДІ: 10,7-30,0 %). Водночас лівобічні пневмонії діагностувались не часто, у шести пацієнтів – три вогнищевих та три нижньочасточкових.

Побудовані логістичні регресійні моделі для передбачення тяжкого перебігу COVID-19 та ураження легень у пацієнтів з SARS-CoV-2, з покроковим включенням достовірних ознак за методом Вальда.

²⁹⁶ S. P. Weisberg et al., "Distinct antibody responses to SARS-CoV-2 in children and adults across the COVID-19 clinical spectrum," *Nat. Immunol.*, vol. 22, no. 1, pp. 25–31, Jan. 2021, doi: 10.1038/s41590-020-00826-9.

²⁹⁷ E. M. Jacobsen et al., "High antibody levels and reduced cellular response in children up to one year after SARS-CoV-2 infection," *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–16, 2022, doi: 10.1038/s41467-022-35055-1.

²⁹⁸ M. S. Han et al., "Antibody Responses to SARS-CoV-2 in Children With COVID-19," *J. Pediatric Infect. Dis. Soc.*, vol. 11, no. 6, pp. 267–273, 2022, doi: 10.1093/jpids/piac012.

²⁹⁹ I. Maniu, G. C. Maniu, E. Antonescu, L. Duica, N. Grigore, and M. Totan, "SARS-CoV-2 Antibody Responses in Pediatric Patients: A Bibliometric Analysis," *Biomedicines*, vol. 11, no. 5, 2023, doi: 10.3390/biomedicines11051455.

³⁰⁰ E. M. Jacobsen et al., "High antibody levels and reduced cellular response in children up to one year after SARS-CoV-2 infection," *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–16, 2022, doi: 10.1038/s41467-022-35055-1.

³⁰¹ F. Palabiyik, S. O. Kokurcan, N. Hatipoglu, S. O. Cebeci, and E. Inci, "Imaging of COVID-19 pneumonia in children," *Br. J. Radiol.*, vol. 93, no. 1113, p. 20200647, Sep. 2020, doi: 10.1259/bjr.20200647.

³⁰² P. Caro-Dominguez et al., "Thoracic imaging of coronavirus disease 2019 (COVID-19) in children: a series of 91 cases," *Pediatr. Radiol.*, vol. 50, no. 10, pp. 1354–1368, Sep. 2020, doi: 10.1007/s00247-020-04747-5.

Отримані результати логістичної регресії підтверджують важливість восьми факторів, які взаємодіючи мають значущий вплив на розвиток тяжкого перебігу COVID-19 у госпіталізованих дітей. Зокрема, діарея, кашель, задишка, рівень сатурації, температура на момент госпіталізації, кількість лейкоцитів, СРП та рівень IgM є важливими прогностичними показниками.

$$C = 0,053 \cdot X_1 + 0,087 \cdot X_2 - 0,137 \cdot X_3 - 0,201 \cdot X_4 + 0,858 \cdot X_5 + \\ + 0,003 \cdot X_6 + 0,044 \cdot X_7 + 0,011 \cdot X_8 + 17,282$$

У логістичній регресійній моделі передбачення розвитку пневмонії, спричиненої SARS-CoV-2, у госпіталізованих дітей, виокремлено дев'ять факторів: вік, гарячку, кашель, задишку, рівень IgA, IgM, лейкоцитів, тромбоцитів, СРП, які були ідентифіковані як ключові елементи для даного прогнозу.

$$C = 0,070 \cdot X_1 + 0,021 \cdot X_2 + 1,273 \cdot X_3 + 2,286 \cdot X_4 + 1,368 \cdot X_5 + \\ + 0,286 \cdot X_6 - 0,130 \cdot X_7 - 0,0027 \cdot X_8 + 0,018 \cdot X_9 - 1,426$$

Науковцями з Китаю для передбачення тяжкого перебігу COVID-19 було вибрано комбінацію таких факторів, як вік, СРП, Д-димер, IL-6 та IL-10. Однак модель логістичної регресії не виявила достатньої ефективності³⁰³.

У дітей діагноз МЗС, асоційованого з SARS-CoV-2 підтверджено на підставі клінічних проявів, позитивних результатів IgG до SARS-CoV-2, відсутніх/наявних РНК SARS-CoV-2, негативних результатах бактеріологічних досліджень крові, сечі та калу.

МЗС розвинувся у 84,85 % дітей після не діагностованого в анамнезі COVID-19 та з негативним ПЛР тестом на SARS-CoV-2 при госпіталізації. Проте у 15,15 % пацієнтів з МЗС було виявлено РНК SARS-CoV-2 методом ПЛР з матеріалу мазків з носоглотки. За даними науковців США, середній інтервал між початком симптомів COVID-19 та початком МЗС становив 25 днів (від 6 до 51 дня)³⁰⁴. У дітей Львівської області відповідь МЗС відбулася до 48-го дня після перенесеного SARS-CoV-2³⁰⁵.

Більшість госпіталізованих пацієнтів з МЗС не мали фонових захворювань. У двох дітей виявлено ожиріння (6,06 %), в однієї – білково-невротична недостатність (3,03 %). Хоча ожиріння є найчастішою супутньою патологією, проте вона є не провідною з коморбідних станів при МЗС як у нашому дослідженні, так і в колег за кордоном³⁰⁶.

Узагальнюючи результати досліджень, визначено, що середня тривалість хвороби на догоспітальному етапі становила $6,79 \pm 2,15$ днів (min-2; max-12). Причинами госпіталізації були: підвищення температури тіла (100 %), негнійне ураження кон'юнктив (94 %), поліморфна екзантема (87,8 %), діарейний синдром (63,64 %), абдомінальний (больовий) синдром (63,63 %), набряковий синдром (42,4 %), кашель (39,4 %), задишка (33,4 %).

У пацієнтів з МЗС превалювала гіпертермія (39,1°C – 40,1°C) виявлена у 81,8 % випадків; гіперпірексія (> 40,1°C) – у 9,1 % пацієнтів; фебрильна температура (38,1°C – 39,0°C) – у 6,1 % дітей. Середина тривалість гарячки при МЗС склала 6,00 днів [5,00-7,00] (при середньому значенні 5,88 днів).

³⁰³ G. Qian et al., "Reduced inflammatory responses to SARS-CoV-2 infection in children presenting to hospital with COVID-19 in China," *EClinicalMedicine*, vol. 34, p. 100831, 2021, doi: 10.1016/j.eclinm.2021.100831.

³⁰⁴ L. R. Feldstein et al., "Multisystem Inflammatory Syndrome in U.S. Children and Adolescents," *N. Engl. J. Med.*, vol. 383, no. 4, pp. 334–346, 2020, doi: 10.1056/nejmoa2021680.

³⁰⁵ V. R. M. I.Y. Avramenko, N.S. Kosmynina, M.V. Stasiv, "COVID-19 in Children: Multisystem Inflammatory Syndrome," *Ukr. J. Perinatol. Pediatr.*, vol. 90, no. 2, pp. 24–30, 2022, doi: 10.15574/PP.2022.90.17.

³⁰⁶ T. Radia et al., "Multi-system inflammatory syndrome in children & adolescents (MIS-C): A systematic review of clinical features and presentation," *Paediatr. Respir. Rev.*, vol. 38, pp. 51–57, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.prrv.2020.08.001.

Аналізуючи поліморфізм клінічних проявів МЗС у дітей, встановлено, що сухий кашель турбував приблизно третину пацієнтів. Задишку було діагностовано в 11 дітей, з яких у 2 випадках вона мала експіраторний характер, а у 9 – змішаний. Задишка змішаного характеру превалювала, особливо у пацієнтів третьої вікової групи. При проведенні аускультатії легень було виявлено жорстке дихання, сухі хрипи та ослаблене дихання.

У дослідженні дітей із МЗС визначено, що синдром ураження ШКТ, який включає нудоту, блювання, діарею водянистого характеру, гемоколіт та біль у животі, був однією з головних причин госпіталізації пацієнтів. У пацієнтів третьої вікової груп (≥ 10 р. < 18 р.) встановлено статистично значуще зростання частоти водянистої діареї та болю у животі у порівнянні з іншими віковими групами. У першій віковій групі (≥ 1 р. < 5 р.) відзначено зниження апетиту, нудоту та блювання; у другій (≥ 5 р. < 10 р.) – частота нудоти, блювання, зниження апетиту та болю у животі зростали. Дані нашого дослідження близькі до результатів науковців з Великої Британії, які зазначають, що у 71% пацієнтів, які страждали від МЗС, виявлено розлади з боку ШКТ. Проте варто відмітити, що у їх когортному дослідженні у 59 % осіб ПЛР-тест на SARS-CoV-2 був позитивним³⁰⁷.

Наступною за частотою клінічною ознакою був висип, зокрема плямисто-папульозний, який спостерігався у переважній більшості дітей (78,8 %), геморагічний висип – у 57,6 % випадків. У доступних медичних джерелах наведено, що ураження шкіри та кон'юнктивіт тісно пов'язані з ушкодженням коронарних судин³⁰⁸.

Аналізуючи набряковий синдром при МЗС, виявлено значну його поширеність в ділянці кистей рук (48,5 %) та стоп (18,2 %); поширений по тілу набряк спостерігався у 9,1 % пацієнтів.

Ураження слизових оболонок виявлено у більшості пацієнтів (81,1 %) а саме: малиновий язик у 45,5 % та розтріскані/пошкоджені губи у 51,5 %.

Слід зауважити, що при дослідженні загального аналізу крові на момент госпіталізації у пацієнтів з МЗС спостерігалось підвищення кількості лейкоцитів, з середнім його значенням $12,40 \times 10^9/\text{л}$ [9,13; 27,10]. На третій день стаціонарного лікування лейкоцитоз нарів і середнє його значення становило $22,44 \times 10^9/\text{л}$ [14,63; 32,17].

В усіх пацієнтів досліджуваної групи на момент госпіталізації був вираженим нейтрофіліоз і середнє його значення становило $82,00 \times 10^9/\text{л}$ [80,00; 87,00] із тенденцією до зростання на третій день лікування, середнє значення якого становило 85,50 % [74,50; 92,00].

При визначенні кількості тромбоцитів у пацієнтів досліджуваної групи на момент поступлення середнє його значення було зниженим і становило $148,00 \times 10^9/\text{л}$ [109,00; 214,00] ($p < 0,05$).

Простеживши динаміку показників периферичної крові у пацієнтів з МЗС кожної вікової групи зокрема, виявлені найвищі значення показника лейкоцитів при госпіталізації у першій віковій групі з середнім значенням $18,78 \times 10^9/\text{л}$ [11,37; 25,19] ($p < 0,05$). Однак цей показник у динаміці на третій день був найвищим у пацієнтів третьої вікової групи, з середнім його значенням $23,64 \times 10^9/\text{л}$ [11,79; 39,00] ($p < 0,05$). Нейтрофільні гранулоцити при госпіталізації були найвищими у другій віковій групі з середнім значенням 87,50 % [81,75; 92,25], ($p < 0,05$). У динаміці цей показник був незначно вищим у третій віковій групі пацієнтів, середнє значення якого становило 88,90 % [82,00; 92,00], ($p < 0,05$). Середнє значення показника тромбоцитів як при госпіталізації, так і на третій день лікування було найнижчим у другій віковій групі і становило $102,00 \times 10^9/\text{л}$

³⁰⁷ T. Radia et al., "Multi-system inflammatory syndrome in children & adolescents (MIS-C): A systematic review of clinical features and presentation," *Paediatr. Respir. Rev.*, vol. 38, pp. 51–57, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.prrv.2020.08.001.

³⁰⁸ J. Y. Abrams et al., "Factors linked to severe outcomes in multisystem inflammatory syndrome in children (MIS-C) in the USA: a retrospective surveillance study," *Lancet Child Adolesc. Heal.*, vol. 5, no. 5, pp. 323–331, 2021, doi: 10.1016/S2352-4642(21)00050-X.

[89,75; 111,50] та $123,00 \times 10^9/\text{л}$ [68,25; 146,25] ($p < 0,05$). Встановлено прямі кореляційні зв'язки між рівнем лейкоцитів: з показником ШОЕ та ПІ при госпіталізації ($r = +0,42$; $p < 0,05$) та ($r = +0,46$; $p < 0,05$) відповідно. Підвищені рівні Д-димеру та знижені рівні тромбоцитів, вважаються сприятливими у патофізіології розвитку МЗС^{309,310}.

Слід зазначити, що під час дослідження виявлено, що запальні маркери були підвищеними при поступленні і мали тенденцію до зростання в динаміці. Середнє значення ШОЕ при госпіталізації становило 24,00 мм/год [18,00; 35,00]. У динаміці, на шостий день, цей показник склав 28,00 мм/год [9,50; 39,25].

Серединне значення рівня СРП при госпіталізації та на третій день лікування (СРП 2) становило 80,00 мг/л [24,00; 98,00] та 96,00 мг/л [48,00; 192,00] відповідно.

При вивченні прокальцитоніну було виявлено, що серединне його значення при госпіталізації та на третій день має таку динаміку: 2,39 нг/мл [0,53; 7,90] та 0,70 нг/мл [0,15; 3,46] відповідно. Зокрема встановлено помірний прямий кореляційний зв'язок між рівнем прокальцитоніну 1 та показниками тромбоцитів ($r = +0,42$; $p < 0,05$) та фібриногену 1 ($r = +0,59$; $p < 0,05$). Слід зазначити статистично значущі кореляційні зв'язки між рівнями прокальцитоніну 1 і таких параметрів, як нейтрофілів при госпіталізації ($r = +0,80$; $p < 0,0001$) та на третій день лікування ($r = +0,54$; $p < 0,05$); тромбоцитів (третій день лікування) ($r = -0,50$; $p < 0,05$). Отримані результати свідчать про важливі аспекти взаємозв'язку між рівнем прокальцитоніну при госпіталізації та різними показниками крові у дітей з МЗС³¹¹.

Вдалося з'ясувати, що серединне значення рівня ІЛ-6 на момент госпіталізації у пацієнтів з МЗС було найвищим і становило 12,65 пг/мл [9,45; 18,88] (при середньому значенні 53,8 пг/мл). У дослідженні виявлено прямий кореляційний зв'язок між рівнями ІЛ-6 та феритином ($r = +0,62$; $p < 0,05$)³¹². При вивченні ІЛ-10 у сироватці крові 17 пацієнтів середній рівень цього показника становив $25,88 \text{ пг/мл} \pm 63,50$. У 34 обстежуваних пацієнтів із МЗС показник ІЛ-2, як при первинному, так і при повторному заборі, був негативним.

Виявлені значно підвищені рівні маркерів запалення свідчать про інтенсивну та системну відповідь організму на перенесену SARS-CoV-2³¹³.

У контексті дослідження протеїнограми у пацієнтів із МЗС, діагностовано, що у дітей з набряково-асцитичним синдромом виявлені зміни у показниках загального білка та його фракції – альбуміну. На початку стаціонарного лікування спостерігалось зниження загального білка та альбуміну, особливо помітне в третій віковій групі. Слід зазначити, що серединне значення альбуміну на третю добу лікування у усіх дітей з МЗС знизилось майже вдвічі і становило 35,00 г/л [23,50; 39,70] (при середньому значенні 33,23 г/л), що стало однією з причин набрякового синдрому та полісерозиту.

Аналіз рівня загального білка в різних вікових групах пацієнтів із МЗС виявив відмінності в початкових значеннях: у першій віковій групі цей показник був найвищим, а в третій – найнижчі. Після лікування рівні білка у пацієнтів усіх вікових груп виявлялись в межах норми, проте у дітей

³⁰⁹ S. A. Lapp et al., "Serologic and Cytokine Signatures in Children with Multisystem Inflammatory Syndrome and Coronavirus Disease 2019," *Open Forum Infect. Dis.*, vol. 9, no. 3, 2022, doi: 10.1093/ofid/ofac070.

³¹⁰ O. V Swann et al., "Clinical characteristics of children and young people admitted to hospital with covid-19 in United Kingdom: prospective multicentre observational cohort study," *BMJ*, p. m3249, Aug. 2020, doi: 10.1136/bmj.m3249.

³¹¹ A. Stasiak, E. Perdas, and E. Smolewska, "Risk factors of a severe course of pediatric multi-system inflammatory syndrome temporally associated with COVID-19," *Eur. J. Pediatr.*, vol. 181, no. 10, pp. 3733–3738, 2022, doi: 10.1007/s00431-022-04584-8.

³¹² S. A. Lapp et al., "Serologic and Cytokine Signatures in Children with Multisystem Inflammatory Syndrome and Coronavirus Disease 2019," *Open Forum Infect. Dis.*, vol. 9, no. 3, 2022, doi: 10.1093/ofid/ofac070.

³¹³ S. A. Lapp et al., "Serologic and Cytokine Signatures in Children with Multisystem Inflammatory Syndrome and Coronavirus Disease 2019," *Open Forum Infect. Dis.*, vol. 9, no. 3, 2022, doi: 10.1093/ofid/ofac070.

віком від 1 до 5 років виявилися найнижчими. За даними науковців, після завершення лікування відбувається відновлення синтезу білка та його фракцій³¹⁴.

Аналізуючи рівень Д-димеру, як одного з показників гемостазу, середнє значення в усіх пацієнтів на момент госпіталізації становило 4083,50 нгФЕОд/мл [2772,75; 5493,00], що втричі перевищувало верхню границю норми, та з найвищим його показником 4661,00 нгФЕОд/мл [3026,55; 5610,50] у дітей третьої вікової групи. У контексті дослідження Д-димеру виявлено статистично значущі прямі кореляційні зв'язки між рівнями прокальцитоніну на момент госпіталізації та на третій день: ($r = +0,56$; $p < 0,05$) та ($r = +0,77$; $p < 0,05$), відповідно; та сильний прямий ($r = +0,97$; $p < 0,05$) з INR при поступленні³¹⁵.

Слід зазначити, що середнє значення феритину у пацієнтів досліджуваної групи на момент поступлення становило 412,00 нг/мл [238,50; 702,50]. Аналіз рівня феритину за віковими групами показав, що у третій віковій групі середнє значення цього показника було вищим і становило 473,00 нг/мл.

При дослідженні ПІ виявлено, що у пацієнтів з МЗС цей показник при госпіталізації був в межах норми і середнє його значення 92,00 % [76,20; 101,00] (при середньому значенні 95,28 %). ПЧ теж не відрізнявся від норми як при поступленні у стаціонар, так і у динаміці. Результати INR також підтверджувало відсутність порушення функції коагуляції. Винятковими виявились результати ПІ у пацієнтів першої вікової групи, середнє значення якого виявилось високим – 148,00 % [138,00; 149,00].

Аналізуючи кореляційні зв'язки встановлено: статистично достовірні сильні зворотні кореляції між СРП 1 та ПЧ 3 ($r = -0,85$; $p < 0,05$), СРП 2 та ПІ 2 ($r = -0,79$; $p = 0,01$), СРП 2 та ПІ 3 ($r = -0,80$; $p < 0,05$); статистично достовірні сильні прямі кореляційні зв'язки між СРП 2 та фібриногеном 2 (третій день лікування) ($r = +0,87$; $p < 0,05$) СРП 2 і фібриногеном 3 (шостий день лікування) ($r = +0,93$; $p < 0,05$).

Аналізуючи результати досліджень рівня тропоніну І у пацієнтів з COVID-19 та МЗС виявлено, що середні рівні показника є вищими у пацієнтів з МЗС на відміну від дітей й SARS-CoV-2: 0,20 нг/мл [0,12; 0,35] та 0,10 нг/мл [0,10; 0,12], відповідно ($p < .001$).

Як зазначають Stasiak A et al. результати NT-proBNP, тропоніну, креатиніну, тригліцеридів, СРП, прокальцитоніну, ферритину, Д-димеру та зниженими показниками гематокриту, кількості тромбоцитів, лімфоцитів та фракції викиду за даними мають спонукати до настороження щодо підвищеного ризику розвитку тяжкого перебігу хвороби³¹⁶.

Заслуговують на увагу результати досліджень IgA, IgM, IgG до SARS-CoV-2. З'ясовано, що на момент поступлення найвищі показники були зафіксовані для IgG-S до SARS-CoV-2, середнє значення якого становило 8,87 [6,80; 9,68], в той час як середнє значення IgG-N до SARS-CoV-2 було нижчим – 6,96 [3,33; 7,61] ($p < 0,05$). Після тримісячного періоду виявлено збільшення рівня IgG-S та зменшення IgG-N до SARS-CoV-2, з середніми значеннями 9,19 [7,37; 9,28] та 1,53 [1,06; 2,59], відповідно.

Рівень IgG-S до SARS-CoV-2 виявився залежним від віку пацієнтів, і найвище його середнє значення спостерігалось у другій віковій групі – 9,15 [8,91; 10,42].

³¹⁴ Z. Belhadj et al., "Acute Heart Failure in Multisystem Inflammatory Syndrome in Children in the Context of Global SARS-CoV-2 Pandemic," *Circulation*, vol. 142, no. 5, pp. 429–436, 2020, doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.120.048360.

³¹⁵ A. Stasiak, E. Perdas, and E. Smolewska, "Risk factors of a severe course of pediatric multi-system inflammatory syndrome temporally associated with COVID-19," *Eur. J. Pediatr.*, vol. 181, no. 10, pp. 3733–3738, 2022, doi: 10.1007/s00431-022-04584-8.

³¹⁶ A. Stasiak, E. Perdas, and E. Smolewska, "Risk factors of a severe course of pediatric multi-system inflammatory syndrome temporally associated with COVID-19," *Eur. J. Pediatr.*, vol. 181, no. 10, pp. 3733–3738, 2022, doi: 10.1007/s00431-022-04584-8.

При вивченні кореляційних зв'язків між рівнем IgG до SARS-CoV-2 та показниками лейкоцитів та ШОЕ виявлено прямі середньої сили кореляції ($r = +0,37$; $p < 0,05$) та ($r = +0,61$; $p < 0,05$). Також виявлено сильний негативний кореляційний зв'язок між рівнем IgG та ПІ на третю добу госпіталізації ($r = -0,77$; $p < 0,05$) та середньої сили негативний кореляційний зв'язок між рівнем IgG та загальним білком при госпіталізації ($r = -0,40$; $p < 0,05$). Крім цього виявився прямий кореляційний зв'язок помірної сили між IL-6 1 і IgG-S ($r = +0,414$; $p > 0,05$). У дослідженні проведеному у США встановлено, що МЗС пов'язано з високими титрами антитіл IgG-S до SARS-CoV-2 та гострою гіперцитокінемією з IL-6, IL-10, IL-17A та IFN- γ ³¹⁷. Результати нашого дослідження є співзвучними з вищезгаданими.

Дослідження IgM 1 та IgA 1 до SARS-CoV-2 показало, що середнє значення IgM 1 було найнижчим – 0,28 [0,15; 1,33] і виявлено незначну відмінність середнього значення IgA – 0,43 [0,20; 1,22]. Слід звернути увагу, що високий рівень IgA 1 виявив прямі функціональні кореляційні зв'язки з феритином ($r = +1$; $p < 0,0001$) та прокальцитоніном 1 ($r = +1$, $p < 0,0001$). Зауважимо, що існує функціональний обернений кореляційний зв'язок між показником IgA1 та ПІ на третій день госпіталізації ($r = -1$; $p < 0,0001$).

Під час аналізу рентгенологічних досліджень виявлено, що серед 33 обстежених пацієнтів з МЗС 51,5 % діагностовано пневмонію: у 18,8 % (95%ДІ: 7,8-34,7 %) двобічну нижньочасточкову; у 9,4 % (95%ДІ: 2,3-23,0 %) – правобічну вогнищеву; у 6,3 % (95%ДІ: 1,0-18,6 %) – двобічну вогнищеву; правобічний пневмоторакс – в однієї дитини (3,1 %) (95%ДІ: 0,1-13,7 %) та у чотирьох осіб (12,5 %) (95%ДІ: 4,0-27,1 %) – тимомегалію. Найчастіше випадки пневмонії реєстрували серед дітей другої вікової групи – 57,14 %.

Аналізуючи результати дослідження ЕХО-КГ, діагностовано, що фракція викиду в середньому становила $63,9 \% \pm 1,2$ (min-37; max-72), низька (54-56 %) – у трьох пацієнтів; гідроперикард – у чотирьох осіб (12,12 %); у 20 дітей (60,61 %) – лінійне розширення коронарних судин більше 0,3 см до 1,4 см.

Водночас, базуючись на даних УЗД у 15,15 % пацієнтів виявлено ознаки полісерозиту: рідина в черевній (45,45 %) та плевральній (15,15 %) порожнинах і в перикарді (12,12 %).

Надалі, у ході дослідження з-поміж аналізованих даних, за допомогою методу логістичної регресії, нами було виокремлено 7 факторів (X1-X7): Д-димер, феритин, прокальцитонін, тромбоцити, СРП, протромбінний індекс, альбумін, які при поєднаній дії мають вірогідний вплив на ураження коронарних судин у госпіталізованих дітей з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2, ($p < 0,05$).

$$C = 0,0008 * X1 + 0,0001 * X2 + 0,0011 * X3 - 0,0145 * X4 + 0,0061 * X5 + \\ + 0,3391 * X6 - 0,2411 * X7 - 22,4705$$

ВИСНОВКИ

У ході проведеного комплексного дослідження, в якому взяли участь 110 дітей з COVID-19 та 33 дітей з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2, були вивчені клініко-імунологічні особливості їх перебігу. Важливим для практичного значення є прогнозування ризику розвитку пневмонії, тяжкого перебігу COVID-19 та ризику ураження коронарних судин у дітей з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2. Отримані дані дозволили удосконалити менеджмент пацієнтів з COVID-19 та МЗС, асоційованого з SARS-CoV-2.

³¹⁷ S. A. Lapp et al., "Serologic and Cytokine Signatures in Children with Multisystem Inflammatory Syndrome and Coronavirus Disease 2019," Open Forum Infect. Dis., vol. 9, no. 3, 2022, doi: 10.1093/ofid/ofac070.

1. Встановлено, що провідними симптомами у дітей з COVID-19 були підвищена температура тіла та кашель. У 72,73 % пацієнтів з SARS-CoV-2 переважав середньо-тяжкий перебіг хвороби. У дітей віком від 10 до 18 років частіше у 66,67 % спостерігався тяжкий перебіг COVID-19 ($p < 0,05$). У даній віковій групі превалювали діарея та біль у животі ($p < 0,05$).

У всіх пацієнтів з МЗС була підвищення температури тіла, негнійний кон'юнктивіт діагностовано у 94 % дітей, поліморфна екзантема – у 87,8 %, діарейний синдром – у 63,64 %, абдомінальний синдром – у 63,63 % та набряковий синдром – у 42,4 %. У 15,15 % пацієнтів виявлено ознаки полісерозиту.

2. Аналізуючи результати гемограми, виявлено, що в усіх пацієнтів з SARS-CoV-2, незалежно від тяжкості перебігу хвороби кількість лейкоцитів у периферичній крові була в межах норми, зростаючи в динаміці у пацієнтів з тяжким перебігом ($p < 0,05$). Водночас у пацієнтів віком від 10 до 18 років виявилось найнижче середнє значення кількості тромбоцитів ($p < 0,05$).

Найвищий серединний показник лейкоцитів – $23,64 \times 10^9/\text{л}$ виявлено у дітей з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 віком від 10 до 18 років ($p < 0,05$). Відсоткове значення нейтрофільних гранулоцитів та кількість тромбоцитів при госпіталізації було найвищими у пацієнтів вікової групи від 5 до 10 років ($p < 0,05$).

Результати досліджень показали, що у пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19 серединні значення рівнів прокальцитоніну, СРП, IL-6 та IL-10 були значно вищими ($p < 0,05$). Середнє значення рівня прокальцитоніну при госпіталізації корелювало з тяжкістю хвороби ($r = +0,51$; $p < 0,05$). У дітей з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 серединні значення рівнів СРП, IL-6 та прокальцитоніну були достовірно вищими, ніж у пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19 ($p < 0,05$).

3. Аналізуючи рівень Д-димеру, як одного з показників гемостазу, виявлено, що серед пацієнтів з тяжким перебігом SARS-CoV-2 на момент госпіталізації та у динаміці його серединні значення були статистично достовірно вищими ($p < 0,05$), та корелював з тяжкістю перебігу хвороби ($r = +0,35$; $p < 0,05$).

У всіх пацієнтів з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 середнє значення рівня Д-димеру на момент госпіталізації втричі перевищувало верхню границю норми, з найвищим його показником у дітей віком від 10 до 18 років.

4. При аналізі гуморального імунітету встановлено, що найвище середнє значення IgM до SARS-CoV-2 виявлено до 30 дня від початку захворювання у пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19. Сироваткові IgM до SARS-CoV-2 на першому тижні демонструють кореляційні зв'язки з віком пацієнтів та тяжкістю ($r = +0,31$; $p < 0,05$). У пацієнтів з тяжким перебігом COVID-19 IgA до SARS-CoV-2 були позитивними з другого тижня. У всіх пацієнтів з COVID-19 сироваткові IgG-N- та IgG-S до SARS-CoV-2 були вищими у пацієнтів з тяжким перебігом хвороби у порівнянні з середньо-тяжким. Середнє значення IgG-S було найвищим до трьох місяців постінфекційного періоду ($p < 0,05$).

Серед усіх пацієнтів з МЗС середнє значення рівня IgG-S до SARS-CoV-2 становило 8,87 [6,80; 9,68] і було статистично достовірно вищим ніж у пацієнтів з COVID-19 ($p < .001$).

5. Серед усіх пацієнтів з COVID-19 рентгенологічно діагностовано пневмонію у 41,82 %. У дітей з тяжким перебігом хвороби пневмонія виявлена у 63,33 %, серед яких у 96,67 % пацієнтів середнє значення SpO2 становило $86,84 \% \pm 1,05$. У шести дітей застосовано штучну вентиляцію легень.

Випадки пневмонії у пацієнтів з МЗС, асоційованим з SARS-CoV-2 найчастіше реєстрували серед дітей віком від 5 до 10 років. У 60,61 % дітей з МЗС виявлено лінійне розширення коронарних судин, гідроперикард – у 12,12 %.

6. Розроблено моделі логістичної регресії для прогнозування ризику розвитку тяжкого перебігу COVID-19, ураження легень при COVID-19 та ураження коронарних судин при МЗС, асоційованому SARS-CoV-2.

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. З метою прогнозування тяжкого перебігу COVID-19 слід врахувати такі фактори, як діарея, лихоманка, кашель, показники сатурації крові, задишку, рівень IgM до SARS-CoV-2, кількість лейкоцитів у периферичній крові, рівень СРП, використавши формулу

$$C = 0,053 * X_1 + 0,087 * X_2 - 0,137 * X_3 - 0,201 * X_4 + 0,858 * X_5 + \\ + 0,003 * X_6 + 0,044 * X_7 + 0,011 * X_8 + 17,282$$

2. У пацієнтів віком від 10 до 18 років з COVID-19 біль у животі та наявність діареї, слід враховувати для верифікації тяжкого перебігу хвороби.

3. Для прогнозування ризику розвитку пневмонії, асоційованої з SARS-CoV-2 рекомендовано проводити оцінку сукупностей дев'яти ознак: вік, температуру тіла, кашель, задишку, рівні IgA та IgM до SARS-CoV-2, кількість лейкоцитів та тромбоцитів, рівень СРП, застосовувши формулу

$$C = 0,070 * X_1 + 0,021 * X_2 + 1,273 * X_3 + 2,286 * X_4 + 1,368 * X_5 + \\ + 0,286 * X_6 - 0,130 * X_7 - 0,0027 * X_8 + 0,018 * X_9 - 1,426$$

4. Визначення показника вмісту альбуміну у крові пацієнтів з МЗС, асоційованого з SARS-CoV-2, слід проводити на третій день з моменту госпіталізації, у зв'язку з його зниженням у цей період.

5. Для передбачення ризику ураження коронарних судин у дітей з МЗС, асоційованого з SARS-CoV-2 необхідно врахувати сім факторів: рівні Д-димеру, феритину, прокальцитоніну, кількість тромбоцитів, рівень СРП, відсоткове значення протромбінового індексу та вміст альбуміну. Дана персоніфікована комплексна оцінка цього ураження здійснюється за допомогою формули

$$C = 0,0008 * X_1 + 0,0001 * X_2 + 0,0011 * X_3 - 0,0145 * X_4 + 0,0061 * X_5 + \\ + 0,3391 * X_6 - 0,2411 * X_7 - 22,470$$

ЕВОЛЮЦІЯ ПАТОМОРФОЗУ ТУБЕРКУЛЬОЗНОГО УРАЖЕННЯ ЦНС У ХВОРИХ ІЗ ВІЛ/СНІД-ІНФЕКЦІЄЮ ЗА ДАНИМИ КЛІНІКО-МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ

EVOLUTION OF THE PATHOMORPHOSIS OF CENTRAL NERVOUS SYSTEM TUBERCULOSIS IN PATIENTS WITH HIV/AIDS INFECTION ACCORDING TO CLINICAL AND MORPHOLOGICAL ANALYSIS

Сахелашвілі Манана Іванівна, доктор. медичних наук, професор, Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького, sakhelashvilimanana@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2503-5440>

Піскур Зоряна Іванівна, кандидат медичних наук, доцент, Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького, zorjanapiskur@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9920-2291>

Сахелашвілі-Біль Ольга Іванівна, доктор філософії, асистентка, Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького, olaaa1922@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9817-5989>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.16>

Анотація. Робота представляє вивчення клініко-морфологічних особливостей перебігу туберкульозу мозкових оболонок і ЦНС на тлі ВІЛ/СНІД-інфекції в аспекті патоморфозу специфічного процесу. Проаналізували 31 медичний файл хворих на ко-інфекцію ВІЛ/СНІД з туберкульозним ураженням мозкових оболонок і ЦНС за період 2020-2024 рр., а також 79 протоколів розтину померлих у Львівській області від ТБМО і ЦНС протягом 55 років. Досліджувані роки були поділені на 6 періодів: 1-й – 1948-1957, 2-й – 1958-1967, 3-й – 1968- 1977, 4-й – 1978-1987, 5-й – 1988-1998, 6-й – 2020-2024 рр. Хворим у стаціонарі було проведено комплексне клініко-лабораторне і рентгеномографічне обстеження органів дихання та інших систем, а при летальному завершенні специфічного процесу – гістологічне дослідження патологічного матеріалу.

Результати дослідження показали, що туберкульозне ураження головного мозку діагностували у 77,4 % чоловіків з ВІЛ/СНІД-інфекцією, мешканців міста (80,6 %), середній вік яких був 39 років. Важкість процесу нерідко була обумовлено поєднанням легеневого процесу з менінгоенцефалітом (58,1 %). При цьому, найчастіше діагностували дисемінований ТБ легень (61,3 %) і міліарний ТБ (23,6 %), що супроводжувались респіраторною недостатністю (90,3 %) і майже у половини обстежених – хронічним обструктивним захворюванням легень. Одним з найважливіших синдромів при менінгітах і менінгоенцефалітах є менінгеальний. При ураженні мозкових оболонок і головного мозку у хворих найчастіше спостерігали: головний біль, блювоту, загальну шкірну гіперестезію з підвищеною чутливістю до звукових та світлових подразників, наявність позитивних менінгеальних симптомів (97,7 %). При ко-інфекції ВІЛ/СНІД/ТБ найчастіше спостерігали таку супутню патологію і ускладнення як хронічний гепатит С (45,2 %), цироз печінки (22,6 %), асцит (9,6 %), спастичну параплегію (32,1 %), спастичну тетралгію (19,5 %) і церебральний криптококоз – (48,4 %), фенову ретинопатію (38,7 %), ураження сітківки (32,2 %) і асигматизм (19,4 %) тощо. Поєднання легеневого процесу і ураження ЦНС на тлі ВІЛ/СНІД-інфекції сприяло інвалідизації у 54,8 % або навіть смерті–

у 29,3% випадків. При вивченні впливу патоморфозу на морфологічні зміни при ТБ ЦНС було встановлено, що протягом останніх 55 років відбувались значні зміни у перебігу туберкульозного менінгіту і ЦНС. Зокрема, констатовано вірогідне зменшення числа випадків смерті від даного захворювання з 44,1 % у 1-ому періоді до 1,7 % у 4-ому періоді з наступним його збільшенням до 5,0 % у 5-ому і різке збільшення у 6-ому періодах до 37,5 %, а на тлі ко-інфекції (80,6 %). Внаслідок поступового удосконалення режимів хіміотерапії і збільшення частоти ко-інфекції ВІЛ/СНІ/ТБ відбувся індукований патоморфоз специфічного процесу як в легенях, так і в ЦНС. Зокрема, найчастіше стали виявляти дисемінований ТБ легень та міліарний ТБ. У м'яких мозкових оболонках і головному мозку спостерігається периваскулярна лімфоїдна інфільтрація, численні васкуліти і тромбоваскуліти, фібринозно-гнійні нашарування, що сприяло виникненню зон демієлінізації і розм'якшення мозкової тканини. Проте в той же час значно рідше констатували наявність у мозковій речовині туберкульозних гранулом. Важкість туберкульозного процесу обумовлюється поєднанням змін в легенях, мозкових оболонках, мозковій тканині та ускладнень. Все вказане призвело у половини випадків до інвалідазації, у третини – до летального кінця.

Ключові слова: клініка, патоморфологія, патоморфоз, туберкульоз легень, ЦНС, ВІЛ/СНІД.

Abstract. The study presents an investigation of the clinical and morphological features of tuberculosis lesions of the meninges and central nervous system (CNS) in the setting of HIV/AIDS infection, with emphasis on the pathomorphosis of the specific process. A total of 31 medical records of patients with HIV/AIDS co-infection and tuberculous involvement of the meninges and CNS treated during 2020–2024 were analyzed. In addition, 79 autopsy protocols of patients who died from tuberculous meningitis and CNS tuberculosis in the Lviv region over a 55-year period were studied. The investigated years were divided into six periods: period 1 — 1948–1957, period 2 — 1958–1967, period 3 — 1968–1977, period 4 — 1978–1987, period 5 — 1988–1998, and period 6 — 2020–2024. Hospitalized patients underwent comprehensive clinical, laboratory, and radiological examinations of the respiratory system and other organs, while in fatal cases histological examination of pathological material was performed.

The results demonstrated that tuberculous involvement of the brain was most frequently diagnosed in men with HIV/AIDS infection (77.4%), predominantly urban residents (80.6%), with a mean age of 39 years. The severity of the disease was often associated with a combination of pulmonary tuberculosis and meningoencephalitis (58.1%). Disseminated pulmonary tuberculosis (61.3%) and miliary tuberculosis (23.6%) were the most common forms detected, accompanied by respiratory failure (90.3%), while nearly half of the patients had chronic obstructive pulmonary disease. One of the major syndromes in meningitis and meningoencephalitis was meningeal syndrome. Patients with lesions of the meninges and brain most commonly presented with headache, vomiting, generalized cutaneous hyperesthesia, increased sensitivity to sound and light stimuli, and positive meningeal signs (97.7%). In patients with HIV/AIDS/TB co-infection, the most frequent concomitant diseases and complications included chronic hepatitis C (45.2%), liver cirrhosis (22.6%), ascites (9.6%), spastic paraplegia (32.1%), spastic tetraplegia (19.5%), cerebral cryptococcosis (48.4%), background retinopathy (38.7%), retinal lesions (32.2%), and astigmatism (19.4%). The combination of pulmonary tuberculosis and CNS involvement in the setting of HIV/AIDS contributed to disability in 54.8% of cases and death in 29.3%. The study of the influence of pathomorphosis on morphological changes in CNS tuberculosis revealed significant alterations in the course of tuberculous meningitis and CNS lesions over the last 55 years. In particular, there was a significant decrease in mortality from this disease from 44.1% in the first period to 1.7% in the fourth period, followed by an increase to 5.0% in the fifth period and a sharp rise to 37.5% in the sixth period, while in the setting of co-infection

mortality reached 80.6%. As a result of the gradual improvement of chemotherapy regimens and the increasing prevalence of HIV/AIDS/TB co-infection, an induced pathomorphosis of the specific process developed both in the lungs and in the CNS. Disseminated and miliary pulmonary tuberculosis became the most frequently detected forms. In the soft meninges and brain tissue, perivascular lymphoid infiltration, numerous vasculitides and thrombo-vasculitides, as well as fibrinopurulent deposits were observed, contributing to the development of demyelination zones and softening of brain tissue. At the same time, tuberculous granulomas in the brain substance were detected significantly less frequently. The severity of the tuberculous process was determined by the combination of pathological changes in the lungs, meninges, brain tissue, and associated complications. All of the above resulted in disability in approximately half of the cases and in fatal outcomes in one-third of the patients.

Keywords: clinical manifestations, pathomorphology, pathomorphosis, pulmonary tuberculosis, central nervous system, HIV/AIDS.

1. ЕВОЛЮЦІЯ ЕПІДЕМІОЛОГІЇ ТУБЕРКУЛЬОЗУ В УМОВАХ ПОШИРЕННЯ ВІЛ-АСОЦІЙОВАНОЇ КО-ІНФЕКЦІЇ

1.1. Вступ

У сучасних умовах туберкульоз (ТБ) залишається однією з основних причин смерті у всьому світі. За даними багатьох джерел^{1,2,3} у 2022 році за поширенням ТБ займав друге місце після коронавірусної хвороби. Щороку більше 10 млн людей хворіють ТБ, що має прямий вплив на соціально-економічний розвиток суспільства. Встановлено, що в усіх країнах світу ТБ є найчастішою опортуністичною інфекцією, яку реєструють у пацієнтів з ВІЛ-інфекцією^{4,5}. Поширення епідемії ТБ/ВІЛ-інфекції є об'єктивною загрозою національного масштабу та продовжує негативно впливати на працездатний і репродуктивний потенціал населення багатьох країн світу. Україна за темпами зростання епідемії ТБ/ВІЛ-інфекції/СНІДу посідає одне з провідних місць у Східноєвропейському регіоні^{6,7,8,9}.

За світовими даними, кожна четверта людина на землі інфікована *Mycobacterium tuberculosis* (МБТ)^{10,11}. Різними патогенетичними механізмами МБТ з первинного вогнища інфекції

¹ Валецький Ю.М., Ничипорук В.О., Валецька Р.О. Сучасні особливості епідеміологічної ситуації щодо туберкульозу в Україні (огляд). Туберкульоз, захворювання легень, ВІЛ-інфекція. 2024;1 103-108. <https://doi.org/10.30978/TB2024-1-103>.

² Vinnard C, King L, Munsiff S, Crossa A, Iwata K, Pasipanodya J, Proops D, Ahuja S. Long-term Mortality of Patients With Tuberculous Meningitis in New York City: A Cohort Study. Clin. Infect. Dis. 2017;64(4):401–7. Doi: 10.1093/cid/ciw763.

³ World health organization 2023. Global tuberculosis report 2023. <https://www.who.int/teams/global-tuberculosis-programme/tb-reports/global-tuberculosis-report-2023>.

⁴ Валецький Ю.М., Ничипорук В.О., Валецька Р.О. Сучасні особливості епідеміологічної ситуації щодо туберкульозу в Україні (огляд). Туберкульоз, захворювання легень, ВІЛ-інфекція. 2024;1 103-108. <https://doi.org/10.30978/TB2024-1-103>.

⁵ Вінницька О.В., Климанська Л.А., Голубовська О.А. Порівняльна характеристика клініко-епідемічної ситуації з ко-інфекцією ВІЛ і туберкульозу у м. Києві у передпандемічний період та під час повномасштабної війни у 2022 році. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2023;3(54):86-92. Doi: <https://doi.org/10.30978/TB-2023-3-86>.

⁶ Vinnard C, King L, Munsiff S, Crossa A, Iwata K, Pasipanodya J, Proops D, Ahuja S. Long-term Mortality of Patients With Tuberculous Meningitis in New York City: A Cohort Study. Clin. Infect. Dis. 2017;64(4):401–7. Doi: 10.1093/cid/ciw763.

⁷ World health organization 2023. Global tuberculosis report 2023. <https://www.who.int/teams/global-tuberculosis-programme/tb-reports/global-tuberculosis-report-2023>.

⁸ Бабуріна О.А., Смольська І.М., Герасимова Н.А., Маренчук В.Д. Роль ВІЛ-інфекції в епідеміології туберкульозу нервової системи в Одеській області. Досягнення біології та медицини. 2006;2(8): 35-37.

⁹ Epidemiological fact sheet: HIV statistics, globally and by WHO region. July 2023. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/hq-hiv-hepatitis-and-stis-library/j0294-who-hiv-epi-factsheet-v7.pdf?sfvrsn=5cbb3393_7.

¹⁰ Барбова А.І., Журило О.О., Трофімова П.С., Миронченко С. Сучасні методи діагностики туберкульозу. Туберкульоз, захворювання легень, ВІЛ-інфекція. 2018;2(33):8-14. DOI: <http://doi.org/10.30978/TB2018-1-8>.

¹¹ Литвиненко Н.А., Фещенко Ю.І., Погребна М.В. та ін. Патоморфоз хіміорезистентного туберкульозу. Туберкульоз, захворювання легень, ВІЛ-інфекція. 2020;3:48-56. <http://doi.org/10.30978/TB2020-3-48>.

розповсюджується, долає захисні бар'єри, проникає в центральну нервову систему (ЦНС) уражаючи мозкові оболонки і тканини головного мозку (ГМ)⁴. Туберкульозний менінгіт/менінгоенцефаліт (ТБМ/МЕ) є найбільш летальною та інвалідизуючою клінічною формою туберкульозу¹². Діагностика ТБМ/МЕ часто утруднена в зв'язку з різноманітним варіантів перебігу, технологічно складнішим забором зразків для лабораторних досліджень, олігобацилярністю у пацієнтів, часто спостерігається у ВІЛ-позитивних осіб, у яких смертність може перевищувати 50%, незважаючи на ефективну антимікобактеріальну хіміотерапію^{13,14}.

Різнманіття супутніх захворювань і генералізація специфічного процесу часто призводить до діагностичних помилок^{15,16}, розвитку ускладнень і несвоєчасного призначення раціонального протитуберкульозного лікування. У сформованих умовах боротьба з ко-інфекцією потребує здійснення активних і цілеспрямованих діагностично-лікувально-профілактичних заходів, для реалізації яких необхідні глибокі знання спеціалістів усіх лікувальних закладів. В зв'язку з цим, вивчення клініко-діагностичних ознак ТБМ/МЕ має велику роль при встановленні діагнозу і безпосередньо впливає на ефективність лікування, збереження працездатності і життя пацієнта.

У теперішніх умовах в Україні спостерігається несприятлива епідеміологічна ситуація з ТБ. Епідемія ТБ має дві особливості: по-перше – констатується взаємозалежність швидкості розповсюдження ТБ від епідемії ВІЛ-інфекції/СНІДу та поширення наркоманії; по друге – високий рівень хіміорезистентних форм (первинної – до 30 % та вторинної – до 75% у різних регіонах)^{17,18}. Проте, загострення епідемічної ситуації з ТБ у світі вчені пов'язують, насамперед, зі стрімким зростанням масштабів пандемії ВІЛ-інфекції.

Однією з головних причин епідемії мультирезистентного туберкульозу (МР-ТБ) є сприятливі умови для селекції хіміорезистентних штамів МБТ: відсутність повноцінного контрольованого лікування, перерви у лікуванні та погана ізоляція хворих у стаціонарах (нозокоміальна контамінація). Водночас, існують і специфічні передумови для інфікування пацієнтів резистентними штамми МБТ. Ряд зарубіжних дослідників підкреслюють, що саме біологічні фактори ризику є одним з чинників глобального поширення МР-ТБ. Поява резистентних штамів МБТ до антимікобактеріальних препаратів (АМБП) ще більше ускладнює діагностику та

¹² Ніколаєва О.Д. Особливості діагностики позалегенових форм туберкульозу у ВІЛ-інфікованих. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2018;3:33-3. doi: 10.30978/TB2018-2-33.

¹³ Мельник В.П., Хурса Т.Г., Якімова Я.О., Солонинка Г.Я. Аналіз особливостей виявлення, діагностики та перебігу туберкульозу у хворих на ко-інфекцію туберкульоз/ВІЛ. Запорізький медичний журнал. 2017;19:5(104):604-608. Doi: 10.14739/2310-1210.2017.5.110163

¹⁴ Панасюк О.В., Ничипоренко Л.С., Коломійчук Л.А., Євдокимов А.С., Радиш Г.В. Унікальний клінічний випадок ко-інфекції: туберкульоз із багатоорганним ураженням і глибоким імунodefіцитом, що вилікуваний ізоніазидом на тлі антиретровірусної терапії з приводу ВІЛ-інфекції. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2016;4 (27): 45-53.

¹⁵ Барбова А.І., Журило О.О., Трофімова П.С., Миронченко С. Сучасні методи діагностики туберкульозу. Туберкульоз, захворювання легень, ВІЛ-інфекція. 2018;2(33):8-14. DOI: <http://doi.org/10.30978/TB2018-1-8>.

¹⁶ Алгоритм діагностики хіміорезистентного туберкульозу з комплексним використанням гено- та фенотипічних методів у бактеріологічних лабораторіях протитуберкульозних закладів України: метод. рекомендації. К.;2013.24 с.

¹⁷ Литвиненко Н.А., Фещенко Ю.І., Погребна М.В. та ін. Патоморфоз хіміорезистентного туберкульозу. Туберкульоз, захворювання легень, ВІЛ-інфекція. 2020;3:48-56. <http://doi.org/10.30978/TB2020-3-48>.

¹⁸ Мельник В.П., Хурса Т.Г., Якімова Я.О., Солонинка Г.Я. Аналіз особливостей виявлення, діагностики та перебігу туберкульозу у хворих на ко-інфекцію туберкульоз/ВІЛ. Запорізький медичний журнал. 2017;19:5(104):604-608. Doi: 10.14739/2310-1210.2017.5.110163.

лікування туберкульозу^{19,20,21,22}. Через 40 років після відкриття вірусу імунодефіциту людини (ВІЛ) ця інфекція залишається однією з головних проблем охорони здоров'я в усьому світі. Зумовлені ВІЛ-інфекцією зміни імунного статусу, метаболічні розлади, наявність супутніх захворювань та опортуністичних інфекцій ускладнюють діагностику та зумовлюють відстрочення необхідного лікування, що значно погіршує прогноз^{23,24,25,26}. ВІЛ-інфекція призводить до поширення хіміорезистентного ТБ серед населення, збільшення кількості випадків ТБ з розширеною стійкістю до АМБП. Серед хворих з повторними випадками захворювання на ТБ частка лікарсько-стійких форм сягає 43 %^{27,28,29,30}.

Тяжкий імунодефіцит є фактором ризику розвитку ТБМЕ. ТБМЕ у ВІЛ-інфікованих практично завжди перебігає на тлі ТБ легень, а також часто супроводжується залученням до процесу інших внутрішніх органів, особливо внутрішньогрудних лімфатичних вузлів (ВГЛВ), плеври. Частота супутніх позалегеневих локалізацій ТБ збільшується при зниженні рівня CD4⁺-лімфоцитів в крові. Клінічні особливості перебігу ТБМ у ВІЛ-інфікованих пацієнтів залежать від ступеня імуносупресії. Атиповий перебіг реєструється при зниженні CD4⁺-лімфоцитів в крові нижче 100 кл/мл^{31,32,33,34,35,36}.

¹⁹ Литвиненко Н.А., Фещенко Ю.І., Погребна М.В. та ін. Патоморфоз хіміорезистентного туберкульозу. Туберкульоз, захворювання легень, ВІЛ-інфекція. 2020;3:48-56. <http://doi.org/10.30978/TB2020-3-48>.

²⁰ Houben R.M., Dodd P.J. The global burden of latent tuberculosis infection: a re-estimation using mathematical modelling. PLoS Med. 2016;13(10):e1002152 (<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002152>).

²¹ Katala B.Z., Mbelele P.M., Lema N.A. et al. Whole genome sequencing of Mycobacterium tuberculosis isolates and clinical outcomes of patients treated for multidrug-resistant tuberculosis in Tanzania. BMC Genomics. 2020;21(1):174. doi: 10.1186/s12864-020- 6577-1.

²² Noraini PHILIP MSc, Timothy WILLIAM* MBBS, MRCP, and Daisy Vanitha JOHN MSc, PhD. Diagnosis of tuberculous meningitis: challenges and promises. Malaysian J Pathol 2015; 37(1) : 1 – 9.

²³ Сахелашвілі М.І., Платонова І.І., Штибель Г.Д. та ін. Частота і структура мультирезистентного туберкульозу і туберкульозу із розширеною резистентністю у дорослих Львівської області. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2017;1:36-41.

²⁴ Сахелашвілі М.І., Костик О.П., Сахелашвілі-Біль О.І., Піскур З.І. Особливості резистентних форм специфічного процесу у дітей та підлітків з вогнищ мультирезистентної туберкульозної інфекції: клінічна картина та діагностика. Georgian Medical News. 2021;320:70-76. <https://europepmc.org/article/med/34897048>.

²⁵ Тодоріко Л.Д. Особливості еволюції імунопатогенезу лікарсько-резистентного туберкульозу. Клінічна імунологія. Алергологія, інфектологія. 2014;3:16-20.

²⁶ Bychkov A.V., Alexander E. Dorosevich, Jimson W. D'souza Postmortem Investigations Following Human Immunodeficiency Virus Infection. Int. J. Collab. Research on Int. Med. & Public Health. 2009;Vol.1,2:28–46.

²⁷ Ніколаєва О.Д. Особливості діагностики позалегеневих форм туберкульозу у ВІЛ-інфікованих. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2018;3:33-3. doi: 10.30978/ TB2018-2-33.

²⁸ Процюк Р.Г., Петренко В.І., Галан І.О. та ін. Лікування хворих на лікарсько-стійкий туберкульоз. Infusion & Chemotherapy. 2020;1:5. doi: 10.32902/2663-0338-2020-1-75-76.

²⁹ Стандарти медичної допомоги «Туберкульоз». Наказ Міністерства охорони здоров'я України №102 від 19 січня 2023 року. https://phc.org.ua/sites/default/files/users/user90/MOZ_nakaz_19.01.2023_102_standarty_dodatky.pdf.

³⁰ Bowen L.N., Smith B., Reich D., Quezado M., Nath A. HIV-associated opportunistic CNS infections: pathophysiology, diagnosis and treatment. Nat Rev Neurol. 2016 Oct 27;12(11):662-674. doi: 10.1038/nrneurol.2016.149.

³¹ Katala B.Z., Mbelele P.M., Lema N.A. et al. Whole genome sequencing of Mycobacterium tuberculosis isolates and clinical outcomes of patients treated for multidrug-resistant tuberculosis in Tanzania. BMC Genomics. 2020;21(1):174. doi: 10.1186/s12864-020- 6577-1.

³² Noraini PHILIP MSc, Timothy WILLIAM* MBBS, MRCP, and Daisy Vanitha JOHN MSc, PhD. Diagnosis of tuberculous meningitis: challenges and promises. Malaysian J Pathol 2015; 37(1) : 1 – 9.

³³ Корж О.В., Тлустова Т.В., Джемдєєв Т.В., Садовнік Є.С. Особливості морфологічної картини туберкульозного менінгоенцефаліту у ВІЛ-інфікованих. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2014;1:13-8.

³⁴ Тлустова Т.В. Перебіг туберкульозного менінгоенцефаліту у ВІЛ-інфікованих пацієнт. Український пульмонолог. журнал. 2015, 2. Додаток. 13-14

³⁵ Marais S., Pepper D.J., Schutz C., Wilkinson R.J., Meintjes G. Presentation and Outcome of Tuberculous Meningitis in a High HIV Prevalence Setting. PLoS One. 2011;6(5):e20077. Doi: 10.1371/journal.pone.0020077.

³⁶ Méchaï F., Bouchaud O. Tuberculous meningitis: Challenges in diagnosis and management. Rev. Neurol. (Paris). 2019 Sep-Oct;175(7-8):451-457. doi: 10.1016/j.neurol.2019.07.007.

У хворих із глибоким імунodefіцитом позалегенову локалізацію туберкульозного процесу, зокрема, в комбінації з ураженням легень, виявляють вірогідно частіше, ніж легенову^{37,38,39,40,41,42,43}. На тлі прогресуючого імунodefіциту перебіг захворювання набуває агресивного характеру з поширенням МБТ в усьому організмі та формуванням позалегенових форм, із яких найзагрозливішою є ТБМЕ⁴⁴. За даними О.Д. Ніколаєвої⁴⁵, при ко-інфекції ВІЛ/СНІД/ТБ у 26,3 % пацієнтів діагностують ізольований специфічний процес у легенях, у 76,4 % — поєднаний легеновий/позалегеновий ТБ. Із позалегенових форм переважно виявляють ураження лімфатичних системи (40,0 %), плеври (18,2 %) і центральної нервової системи (ЦНС) (7,3 %). За даними багатьох вчених, останніми роками спостерігається збільшення частоти ТБ мозкових оболонок (ТБМ) і ЦНС у дорослих^{46,47,48,49}.

1.2. Особливості клінічного перебігу туберкульозного менінгоенцефаліту

Туберкульозний менінгіт/менінгоенцефаліту є найважчою формою ТБ та має найвищий рівень смертності та захворюваності порівняно з іншими формами ТБ. За даними офіційної статистики за останні 30 років в Україні захворюваність на ТБМ була стабільною і складала 0,08-0,13 на 100 тис населення, смертність – відносно високою 0,4-0,6 на 100 тис. населення, зростаючи кожні п'ять років на 10,0%⁵⁰. Останнім часом починаючи з 2000 року ці показники в Україні підвищуються⁵¹. Перебіг туберкульозного менінгіту і менінгоенцефаліту у ВІЛ-інфікованих українців несприятливий, оскільки зазвичай виникає на тлі генералізації туберкульозної інфекції та розвитку гематогенного

³⁷ Валецький Ю.М., Ничипорук В.О., Валецька Р.О. Сучасні особливості епідеміологічної ситуації щодо туберкульозу в Україні (огляд). Туберкульоз, захворювання легень, ВІЛ-інфекція. 2024;1 103-108. <https://doi.org/10.30978/TB2024-1-103>.

³⁸ Вінницька О.В., Климанська Л.А., Голубовська О.А. Порівняльна характеристика клініко-епідемічної ситуації з ко-інфекцією ВІЛ і туберкульозу у м. Києві у передпандемічний період та під час повномасштабної війни у 2022 році. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2023;3(54):86-92. Doi: <https://doi.org/10.30978/TB-2023-3-86>.

³⁹ Ніколаєва О.Д. Особливості діагностики позалегенових форм туберкульозу у ВІЛ-інфікованих. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2018;3:33-3. doi: 10.30978/ TB2018-2-33.

⁴⁰ Мельник В.П., Хурса Т.Г., Якимова Я.О., Солонинка Г.Я. Аналіз особливостей виявлення, діагностики та перебігу туберкульозу у хворих на ко-інфекцію туберкульоз/ВІЛ. Запорізький медичний журнал. 2017;19:5(104):604-608. Doi: 10.14739/2310-1210.2017.5.110163.

⁴¹ Корж О.В., Тлустова Т.В., Дездежа Т.В., Садовнік Є.С. Особливості морфологічної картини туберкульозного менінгоенцефаліту у ВІЛ-інфікованих. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2014;1:13-8.

⁴² Петренко В.І., Тодоріко Л.Д., Бойко А.В. Актуальні питання діагностики та лікування позалегенового туберкульозу. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2013;3:86-94.

⁴³ Піскур З.І., Костик О.П., Сахелашвілі М.І. та ін. Позалегеновий туберкульоз у дітей: вікові особливості та медикаментозна резистентність збудника. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2022;4:22-9. doi: 10.30978/TB2022-4-22.

⁴⁴ Тлустова Т.В. Перебіг туберкульозного менінгоенцефаліту у ВІЛ-інфікованих пацієнтів. Український пульмонолог. журнал. 2015, 2. Додаток. 13-14.

⁴⁵ Ніколаєва О.Д. Особливості діагностики позалегенових форм туберкульозу у ВІЛ-інфікованих. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2018;3:33-3. doi: 10.30978/ TB2018-2-33.

⁴⁶ Процюк Р.Г., Петренко В.І., Галан І.О. та ін. Лікування хворих на лікарсько-стійкий туберкульоз. Infusion & Chemotherapy. 2020;1:5. doi: 10.32902/2663-0338-2020-1-75-76.

⁴⁷ Петренко В.І., Тодоріко Л.Д., Бойко А.В. Актуальні питання діагностики та лікування позалегенового туберкульозу. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2013;3:86-94.

⁴⁸ Піскур З.І., Костик О.П., Сахелашвілі М.І. та ін. Позалегеновий туберкульоз у дітей: вікові особливості та медикаментозна резистентність збудника. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2022;4:22-9. doi: 10.30978/TB2022-4-22.

⁴⁹ Рябоконь О.В., Ушеніна Н.С., Фурик О.О., Задирака Д.А. Менінгеальний синдром в клініці інфекційних хвороб. Набряк - набуття головного мозку (невідкладна допомога) : навчальний посібник для студентів 6 курсу медичних факультетів. Вид. 2-ге, доп. та перероб. - Запоріжжя : [ЗДМУ], 2021. 105 с.

⁵⁰ Феценко Ю.І., Ільницький І.Г., Мельник В.М., Панасюк О.В. Туберкульоз легеневої локалізації. Київ: Логос. 1998; 376с.

⁵¹ Сахелашвілі М.І., Платонова І.Л., Штибель Г.Д. та ін. Частота і структура мультирезистентного туберкульозу і туберкульозу із розширеною резистентністю у дорослих Львівської області. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2017;1:36-41.

дисемінованого специфічного процесу^{52,53,54,55}. Як у дітей, так і у дорослих часто безпосередніми причинами смерті є туберкульозний менінгіт, менінгоенцефаліт та поліорганна недостатність^{56,57}. Однак характер морфологічних змін у померлих від ТБ мозкових оболонок і ЦНС недостатньо вивчено, що набуває актуальності у зв'язку зі збільшенням кількості таких пацієнтів. Рання діагностика ТБМЕ є складною через неспецифічні симптоми ТБ та малу кількість туберкульозних паличок у спинномозковій рідині (лікворі). Дотепер не існує встановленого діагностичного методу, який би міг швидко виявити *M. tuberculosis* у пацієнтів з ТБ з високою чутливістю та специфічністю. У зв'язку з цим вивчення клініко-морфологічних особливостей ТБМЕ має важливе значення при встановленні діагнозу та безпосередньо впливає на ефективність лікування, збереження працездатності й життя пацієнта.

За даними Т.В. Тлустової⁵⁸ особливості клінічної картини ТБМЕ у хворих на ко-інфекцію туберкульоз/ВІЛ залежать від ступеня імуносупресії. Атиповий перебіг спостерігається при зниженні кількості CD4+-лімфоцитів у крові менше 100 кл/мкл і характеризується зростанням частоти випадків із гострим початком і тривалістю продромального періоду менше 5 днів (50,0 %), відсутністю нудоти (67,3 %) та симптомів ураження черепно-мозкових нервів (26,9 %), у лікворі – з нормальним вмістом білка (28,9 %) і глюкози (18,4 %), відсутністю плеоцитозу (17,8 %) і його нейтрофільним характером (36,8 %). За окремими неврологічними симптомами або їх поєднанням атипова картина ТБМЕ спостерігається в 40,4 % хворих із рівнем CD4+-лімфоцитів нижче 100 кл/мкл.

2. МЕТОДОЛОГІЯ

Проаналізували 31 медичний файл хворих на ко-інфекцію ВІЛ/СНІД/ з туберкульозним ураженням мозкових оболонок (ТБМО) і ЦНС за період 2020-2024 рр., також 79 протоколів розтину хворих, які померли у Львівській області від ТБМО і ЦНС протягом останніх 55 років. Досліджувані роки були поділені на 6 періодів: 1-й – 1948-1957 рр., 2-й – 1958-1967 рр., 3-й – 1968- 1977 рр., 4-й – 1978-1987 рр., 5-й – 1988-1998 рр., 6-й – 2020-2024 рр. Хворим у стаціонарі було проведено комплексне клініко-лабораторне і рентгенотомографічне обстеження органів дихання та інших систем, а при летальному завершенні ТБ – гістологічне дослідження патологічного матеріалу.

Мікробіологічне дослідження включало: виявлення МБТ у мокротинні методом мікроскопії мазка, посіву на середовище Левенштейна-Йєнсена, типування виділених мікобактерій на ВАСТЕС MGIT960, проведення тесту медикаментозної чутливості штамів МБТ до АМБП, молекулярно-генетичне дослідження⁵⁹.

⁵² Сахелашвілі М.І., Костик О.П., Сахелашвілі-Біль О.І., Піскур З.І. Особливості резистентних форм специфічного процесу у дітей та підлітків з вогнищ мультirezистентної туберкульозної інфекції: клінічна картина та діагностика. *Georgian Medical News*. 2021;320:70-76. <https://europepmc.org/article/med/34897048>.

⁵³ Тодоріко Л.Д. Особливості еволюції імунопатогенезу лікарсько-резистентного туберкульозу. *Клінічна імунологія. Алергологія, інфектологія*. 2014;3:16-20.

⁵⁴ Стандарти медичної допомоги «Туберкульоз». Наказ Міністерства охорони здоров'я України №102 від 19 січня 2023 року. https://phc.org.ua/sites/default/files/users/user90/MOZ_nakaz_19.01.2023_102_standarty_dodatky.pdf.

⁵⁵ Тлустова Т.В. Перебіг туберкульозного менінгоенцефаліту у ВІЛ-інфікованих пацієнт. *Український пульмонолог. журнал*. 2015, 2. Додаток. 13-14.

⁵⁶ Бабуріна О.А., Смольська І.М., Герасимова Н.А., Маренчук В.Д. Роль ВІЛ-інфекції в епідеміології туберкульозу нервової системи в Одеській області. *Досягнення біології та медицини*. 2006;2(8): 35-37.

⁵⁷ Барбова А.І., Журило О.О., Трофімова П.С., Миронченко С. Сучасні методи діагностики туберкульозу. *Туберкульоз, захворювання легень, ВІЛ-інфекція*. 2018;2(33):8-14. DOI: <http://doi.org/10.30978/TB2018-1-8>.

⁵⁸ Тлустова Т.В. Перебіг туберкульозного менінгоенцефаліту у ВІЛ-інфікованих пацієнт. *Український пульмонолог. журнал*. 2015, 2. Додаток. 13-14.

⁵⁹ Барбова А.І., Журило О.О., Трофімова П.С., Миронченко С. Сучасні методи діагностики туберкульозу. *Туберкульоз, захворювання легень, ВІЛ-інфекція*. 2018;2(33):8-14. DOI: <http://doi.org/10.30978/TB2018-1-8>.

ВІЛ/СНІД-інфекцію діагностували експрес-тестом, для визначення вірусного навантаження використовували полімеразну ланцюгову реакцію. Статистичний аналіз отриманих результатів провели на підставі пакету програм в системі Excel.

З метою вивчення особливостей клінічного перебігу ТБМЕ проаналізовано клініко-діагностичні прояви ТБМЕ у пацієнтів на фоні ВІЛ-інфекції. Проведено ретроспективний аналіз медичної документації пацієнтів, які перебували на стаціонарному лікуванні з приводу специфічного процесу в Львівському регіональному фтизіопульмонологічному центрі з 2020 по 2024 рр. Відібрали 31 медичну карту пацієнтів з туберкульозним ураженням ЦНС на фоні ВІЛ-інфекції. Пацієнтам проводили загально-клінічне обстеження, мікроскопічне (за Цілем-Нільсеном), молекулярно-генетичне (GeneXpert MTB/Rif) і культуральне дослідження на тверді (Левенштейна-Єнсена) та рідкі (BactecMGIT 960) живильні середовища, а також лінійний зонд-аналіз (Hain Lifesciences) спинномозкової рідини, харкотиння/промивних вод бронхів, біопсійного/резекційного матеріалу та інших рідин згідно чинних стандартів. У разі отримання позитивного результату молекулярно-генетичного та/чи культурального дослідження проводили тест медикаментозної чутливості до АМБП. Застосовували магнітно-резонансну томографію ЦНС, спинномозкову пункцію, рентгенографію та комп'ютерну томографію органів грудної порожнини, ультразвукове дослідження (УЗД) лімфатичних вузлів, морфологічне дослідження біопсійного/резекційного матеріалу та інші необхідні обстеження відповідно до галузевих стандартів надання медичної допомоги⁶⁰.

За даними історій хвороби звертали увагу на таку інформацію: стать, місце проживання, вік, тип ТБ процесу, клінічні форми специфічного ураження, їхню поширеність, супутню патологію, важкість стану, клінічні синдроми їх ознаки на момент госпіталізації до спеціалізованого медичного закладу, дані неврологічного огляду, результати МРТ голови, рентгенологічного і КТ досліджень органів грудної клітки, тривалість процесу до встановлення діагнозу, кількість проведених ліжко-днів, наявність офіційного працевлаштування і факт встановлення тривалої втрати працездатності.

3. РЕЗУЛЬТАТИ

3.1. Сучасні аспекти клінічного перебігу, синдромології та діагностики ко-інфекції ВІЛ/СНІД/ТБ

Аналіз показав, що ТБ ураження головного мозку (ГМ) діагностували серед ВІЛ-позитивних чоловіків (77,4%), які здебільшого були міськими жителями (80,6%); середній вік пацієнтів становив 39 років. У більшості випадків (80,6%) специфічний процес діагностували вперше. Також у 13% пацієнтів виявлено хіміорезистентні форми ТБ (рис. 1).

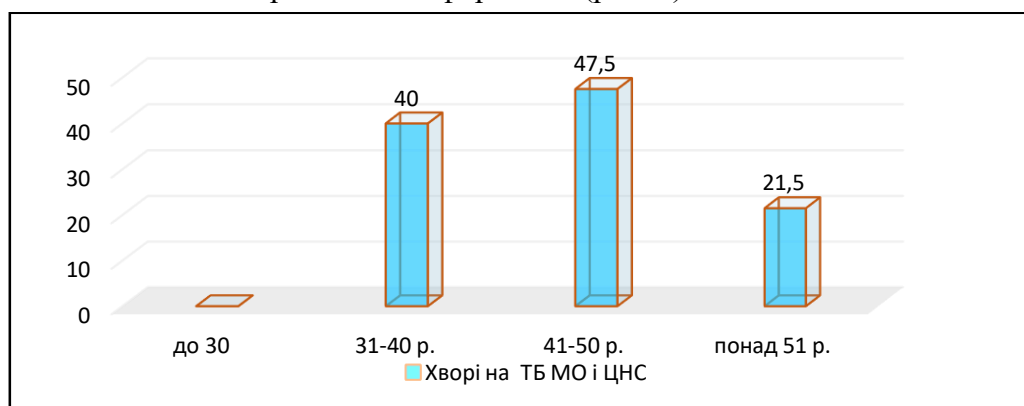


Рисунок 1. Вікова структура хворих на ТБ мозкових оболонок і ЦНС, %

⁶⁰ Стандарти медичної допомоги «Туберкульоз». Наказ Міністерства охорони здоров'я України №102 від 19 січня 2023 року. https://phc.org.ua/sites/default/files/users/user90/MOZ_nakaz_19.01.2023_102_standarty_dodatky.pdf.

Слід відмітити, що 12 осіб (38,7%) були госпіталізовані ургентно, решта пацієнтів (61,3%) випадків – планово. При цьому, у більшості пацієнтів переважав інтоксикаційний синдром (87,1%), симптомокомплекс ураження ЦНС (83,9%) і бронхолегеневий синдром (64,5%), інтоксикаційний + ураження ЦНС + Бронхолегеневий синдроми (58,1%) і інтоксикаційний + Бронхолегеневий синдроми (19,4%).

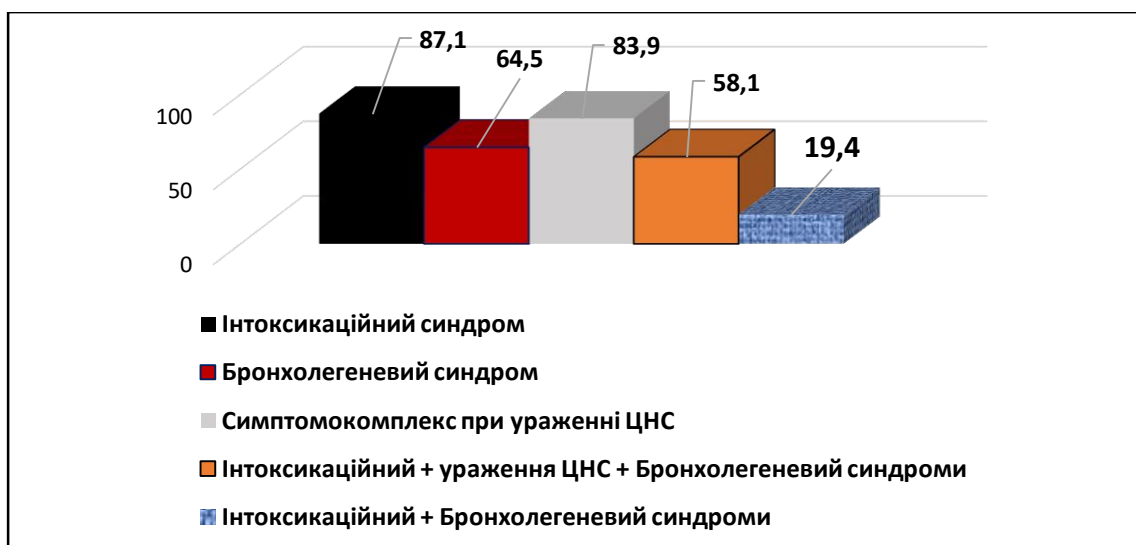


Рисунок 2. Частота синдромів і симптомів у хворих з менінгоенцефалітом на тлі ВІЛ-інфекції, %

Важкість процесу нерідко було обумовлено поєднанням легеневого процесу з менінгоенцефалітом (58,1 %, рис.3). При цьому, найчастіше діагностували дисеміновану форму ТБ легень (61,3 %) і міліарну (23,6 %). Найчастішими рентгенологічними ознаками ураження органів дихання у ВІЛ-позитивних з ТБМЕ були вогнищеві тіні м'якої і середньої інтенсивності у 46,2%, вогнищеві тіні зливного характеру – у 19,2%, посилення легеневого рисунку – у 38,5%, в такої ж кількості легеневий рисунок був деформованим через інтерстиційні зміни, деформованим через перибронхіальних змін – у 3-ох випадках, елементів фіброзу – у двох, поєднання інтерстиційних, пневмосклеротичних, перибронхіальних змін та елементів фіброзу – у 5 пацієнтів; дифузно збагачений – у 5-ти осіб. До того ж, у половини пацієнтів корені були неструктурні. Вартий уваги факт, що у жодного пацієнта ТБ процес будь-якої локалізації не діагностували у фазі деструкції.

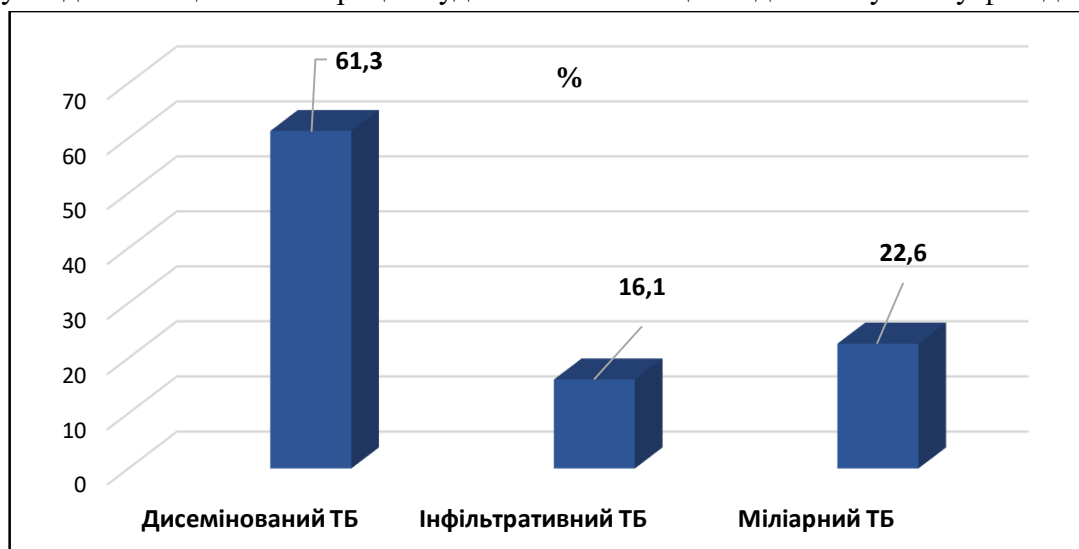


Рисунок 3. Клінічні форми туберкульозу легень (%)

Гострий початок ТБ, наявність у більшості ВІЛ-позитивних осіб проявів інтоксикаційного синдрому, у 83,9% – ознак ураження ЦНС та у кожного другого пацієнта поєднання кількох синдромів при вступі в стаціонар, наявність різноманітних супутніх захворювань, олігобацилярність, невиражені рентген-томографічні ознаки ураження органів дихання призводили до різних діагностичних помилок, сприяли довшій тривалості ТБ процесу (від 2 до 6 місяців) у 35,5% випадків, поширенню ТБ інфекції, розвитку ускладнень, тривалому більше 2,5 місяців перебуванню в стаціонарі і зниженню/втраті працездатності у 58,1% випадків.

Важливо, що двоє пацієнтів, які поступили в стані середньої важкості, відмічали погіршення свого загального стану протягом останніх 6 місяців, однак по медичну допомогу не зверталися, а в 29% випадків специфічний процес тривав від 2-ох до 3-ох місяців, що сприяло генералізації ТБ інфекції в різні органи, розвитку ускладнень у 16,7%, а також тривалому стаціонарному лікуванню і зниженню/втраті працездатності кожного другого ВІЛ-інфікованого пацієнта. Тривалість перебування в стаціонарі хворих коливалася від 23 до 199 днів, при цьому середня кількість склала $(75,0 \pm 3,7)$ ліжко-днів (рис. 4).

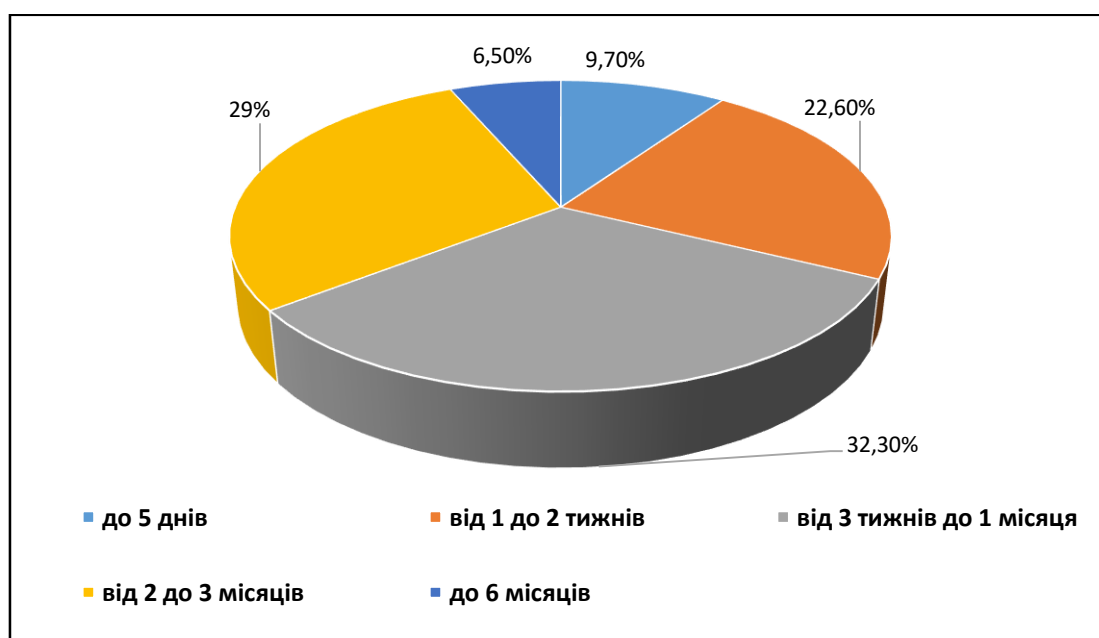


Рисунок 4. Тривалість туберкульозного процесу до встановлення специфічного діагнозу у ВІЛ-позитивних пацієнтів

Наші дослідження свідчать, що одним з найважливіших синдромів при менінгітах і менінгоенцефалітах є менінгоальний. При ураженні мозкових оболонок і ГМ у хворих найчастіше спостерігали: головний біль, блювоту, загальну шкірну гіперестезію з підвищеною чутливістю до звукових та світлових подразників, наявність позитивних менінгеальних симптомів (97,7%). Головний біль був зумовлений дифузними або локалізованими змінами переважно в зоні чола і потилиці, тиснучого або розпираючого характеру. Виникнення головного болю пов'язане з подразненням чутливих закінчень трійчастого нерва, парасимпатичних (блукаючий нерв) і симпатичних волокон, які іннервують оболонки ГМ. Блювання виникало незалежно від прийому їжі, не приносило полегшення хворому. У пацієнтів блювання має центральне походження і пов'язане з подразненням рецепторів блукаючого нерва або його ядер, розташованих на дні IV шлуночка, або блювотного центру в ретикулярній формації²⁹. Шкірна гіперестезія і підвищена

чутливість до звукових і світлових подразників (гіперакузія, світлобоязнь) пов'язана з подразненням задніх корінців. Позитивні менінгеальні симптоми: ригідність потиличних м'язів, симптоми Керніга, Брудзинського, Гієна, Мейтуса, Фанконі та інші – результат рефлекторного тонічного скорочення м'язів як механізм захисту нервових корінців від надмірного подразнення (97,7%).

Одним з **перших симптомів** є:

* **ригідність потиличних м'язів** виникає в результаті підвищення тону м'язів-розгиначів ший. При спробі нахилити голову хворого, що перебуває в положенні лежачи, неможливо приведення підборіддя до груднини (хворий не дістає підборіддям до груднини). Будь-яка спроба супроводжується різким болем (рис. 5). При визначенні ригідності м'язів потилиці хворий повинен лежати без подушки, з руками вздовж тулуба²⁹;

Ригідність потиличних м'язів

Виникає внаслідок підвищення тону м'язів-розгиначів ший.

При спробі нахилити голову хворого, що перебуває в положенні лежачи, неможливо приведення підборіддя до груднини (хворий не дістає підборіддям до груднини). Будь-яка спроба супроводжується різким болем.



Рисунок 5. Ригідність потиличних м'язів⁶¹

* **симптом Керніга** також дуже ранній і характерний симптом ураження мозкових оболонок. Він виражається в неможливості розгинання ноги хворого в колінному суглобі, попередньо зігнутої під прямим кутом в колінному та кульшовому суглобах. Якщо при розгинанні ноги в колінному суглобі, кут нахилу в кульшовому суглобі збільшиться понад 90 градусів, то навіть при різко позитивному симптомі Керніга він буде оцінений як негативний (рис. 6)

⁶¹ Ілюстративний матеріал згенеровано за допомогою сервісу штучного інтелекту chatgpt.com.
https://chatgpt.com/s/t_6a1406ccf8388191b5a07928d554041f.

СИМПТОМ КЕРНІГА

Ранній і характерний симптом ураження мозкових оболонок. Виражається в неможливості розгинання ноги хворого в колінному суглобі, попередньо зігнутої під прямим кутом в колінному та кульшовому суглобах.

Методика визначення



Рисунок 6. Симптом Керніга⁶²

* *симптом Брудзинського верхній* виражається в мимовільному згинанні ніг в колінних суглобах у відповідь на спробу пасивного приведення голови до грудей в положенні лежачи на спині (рис. 7);

СИМПТОМ БРУДЗИНСЬКОГО (ВЕРХНІЙ)

Верхній симптом Брудзинського виражається в мимовільному згинанні ніг в колінних суглобах у відповідь на спробу пасивного приведення голови до грудей в положенні лежачи на спині.



Рисунок 7. Симптом Брудзинського верхній⁶³

* *вильичний симптом Брудзинського* подібна реакція при перкусії вильичної дуги;

* *лобковий симптом Брудзинського* виражається в згинанні ніг в колінних суглобах при натисканні на лонне зчленування (рис. 8);

⁶² Те ж саме 61.

⁶³ Те ж саме 61.

Лобковий симптом Брудзинського

Виражається в згинанні ніг в колінних суглобах при натисканні на лонне зчленування

1. Початкове положення

Пацієнт лежить на спині, ноги випрямлені.



Натискання на лонне зчленування

2. Позитивний симптом

При натисканні на лонне зчленування відбувається згинання ніг в колінних суглобах.



Рисунок 8. Лобковий симптом Брудзинського⁶⁴

* симптом Брудзинського нижній (досліджується разом з симптомом Керніга) – при спробі розгинання ноги в колінному суглобі інша нога згинається в колінному суглобі та приводиться до живота (рис. 9);

СИМПТОМ БРУДЗИНСЬКОГО (НИЖНІЙ)

Нижній симптом Брудзинського при спробі розгинання ноги в колінному суглобі інша нога згинається в колінному суглобі та приводиться до живота.

1. Початкове положення



Пацієнт лежить на спині, ноги розігнуті.

2. Спроба розгинання однієї ноги в колінному суглобі



Лікар здійснює спробу розгинання однієї ноги в колінному суглобі.

3. Позитивний симптом



У відповідь інша нога мимовільно згинається в колінному суглобі та приводиться до живота.

Позитивний нижній симптом Брудзинського свідчить про подразнення мозкових оболонок (наприклад, при менінгіті, субарахноїдальному крововиливі та інших станах).

Механізм:

Розгинання ноги викликає натяг твердої мозкової оболонки та корінців спинного мозку, що призводить до рефлекторного згинання протилежної ноги.

Рисунок 9. Симптом Брудзинського нижній⁶⁵

⁶⁴ Те ж саме 61.

⁶⁵ Те ж саме 61.

* симптом Гієна аналогічний нижньому симптому Брудзинського – при стисненні чотириголового м'яза однієї ноги інша нога згинається в коліні і приводиться до живота (рис. 10).

СИМПТОМ ГІЄНА

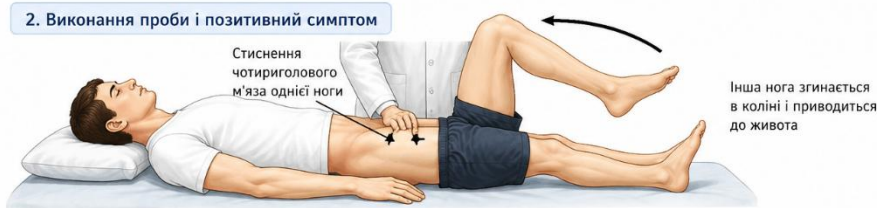
Симптом Гієна – при стисненні чотириголового м'яза однієї ноги інша нога згинається в коліні і приводиться до живота.

1. Початкове положення



Пацієнт лежить на спині, ноги розігнуті.

2. Виконання проби і позитивний симптом



Стиснення
чотириголового
м'яза однієї ноги

Інша нога згинається
в коліні і приводиться
до живота

Рисунок 10. Симптом Гієна⁶⁶

Напруження довгих м'язів спини є частим симптомом менингеального синдрому і виявляється у вигляді таких симптомів:

1. *Симптом Мейтуса* – хворому, який лежить на спині, фіксують розігнуті в колінах ноги правою рукою, а лівою рукою підтримують спину, допомагаючи йому сісти. При менингеального синдромі спина хворого і розігнуті ноги в положенні сидячи утворюють тупий кут: хворий не може сидіти прямо при розігнутих ногах (рис. 11).

Симптом Мейтуса

Хворому, який лежить на спині, фіксують розігнуті в колінах ноги правою рукою, а лівою рукою підтримують спину, допомагаючи йому сісти. При менингеального синдромі спина хворого і розігнуті ноги в положенні сидячи утворюють тупий кут: хворий не може сидіти прямо при розігнутих ногах.



Методика:

1. Пацієнт лежить на спині, ноги розігнуті в колінах.
2. Лікар правою рукою фіксує ступні (гомілки) пацієнта.
3. Лівою рукою підтримує спину, допомагаючи сісти.

Позитивний симптом Мейтуса



При менингеальному синдромі спина і розігнуті ноги в положенні сидячи утворюють тупий кут: хворий не може сидіти прямо при розігнутих ногах.

Примітка:

Симптом Мейтуса вважається позитивним при менингеальному подразненні (менингеальному синдромі).

Рисунок 11. Симптом Мейтуса⁶⁷

⁶⁶ Те ж саме 61.

⁶⁷ Те ж саме 61.

2. *Симптом Фанконі* – неможливість самостійно сісти при розігнутих і фіксованих колінах (рис. 12).



Рисунок 12. Симптом Фанконі⁶⁸

3. *Симптом «триножника»* – хворий може сидіти в ліжку лише спираючись руками за спиною.

4. *Симптом «поцілунку коліна»* - хворий не в змозі навіть при зігнутих в кульшових суглобах нижніх кінцівок доторкнутися губами до коліна.

Досить постійним у хворих різного віку є *вильичний симптом Бехтерева* – при перкусії вильичної дуги посилюється головний біль і мимоволі виникає хвороблива гримаса на відповідній половині обличчя.

Менінгеальні симптоми – неспецифічні ознаки, які свідчать лише про подразнення або запалення мозкових оболонок, що може спостерігатися при багатьох патологічних станах:

- * При черепно–мозкових травмах,
- * Пухлинах головного мозку;
- * Субарахноїдальному крововиливі;
- * Коматозних станах, які супроводжують тяжкий перебіг цукрового діабету, ниркову і печінкову недостатність;
- * Отруєнні чадним газом, тепловому і сонячному ударах.

При залученні в процес речовини головного мозку з'являються загально мозкові симптоми, викликані запальним і токсичним ураженням нейроцитів. Енцефалітична симптоматика різноманітна, вона може проявлятися психомоторним збудженням, порушенням свідомості,

⁶⁸ Те ж саме 61.

ураженням черепно-мозкових нервів (частіше III, VI, VII пари), судомами, зоровими і слуховими галюцинаціями. Часто вогнищева церебральна симптоматика проявляється у вигляді пірамідної недостатності: виражена анізорефлексія (асиметрія) сухожильних та періостальних рефлексів, спастичні гемі- та парепарези, координаторні порушення, позитивні патологічні рефлексі:

Рефлекс Бабінського – при інтенсивному штриховому подразненні зовнішньої частини підошви з'являється повільне тонічне розгинання великого пальця та віялоподібне розведення інших пальців стопи (рис. 13).

РЕФЛЕКС БАБІНСЬКОГО

Рефлекс Бабінського – при інтенсивному штриховому подразненні зовнішньої частини підошви з'являється повільне тонічне розгинання великого пальця та віялоподібне розведення інших пальців стопи.



Рисунок 13. Рефлекс Бабінського⁶⁹

Рефлекс Оппенгейма – при проведенні з натиском великим пальцем по передній поверхні гомілки зверху вниз відзначається розгинання великого пальця іноді з одночасним розведенням інших пальців стопи (рис.14).



Рисунок 14. Рефлекс Оппенгейма⁷⁰

⁶⁹ Те ж саме 61.

⁷⁰ Те ж саме 61.

Оппенгейма рефлекс їжі – при короткочасному дотику до губ, язика з'являються смоктальні, ковтальні рухи орального автоматизму (рис. 15).

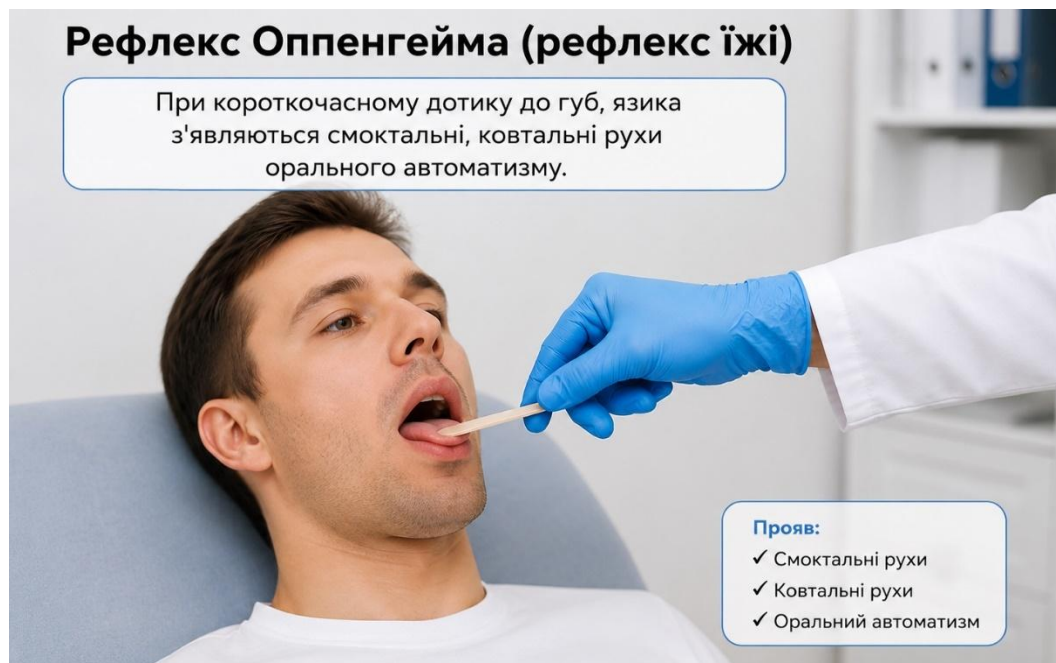


Рисунок 15. Рефлекс Оппенгейма (рефлекс їжі)⁷¹

Рефлекс Россолімо – при постукуванні по кінчиках II - IV пальців ноги, злегка зігнутою в усіх суглобах, з'являється короткочасне підшвинне згинання пальців стопи («кивок пальців») (рис.16).



Рисунок 16. Рефлекс Россолімо⁷²

⁷¹ Те ж саме 61.

⁷² Те ж саме 61.

Порушення рухів у вигляді розладів координації (атаксія) виявляються при проведенні ряду проб. *П'яtkово-колінна проба*: хворому, який лежить на спині із закритими очима, пропонують високо підняти ногу і п'ятою потрапити в коліно іншої ноги – хворий промахується. *Пальце-носова проба*: хворому пропонують повільно потрапити вказівним пальцем в кінчик носа, попередньо відвівши руку, він проносить руку далі від цілі. *П'яtkово-Кулакова проба*: під п'яту хворого, лежачого на спині, лікар підставляє свій кулак і пропонує хворому підняти ногу, а потім опустити її на кулак лікаря –при цьому виявляється атаксії.

Крім динамічної атаксії у хворого може спостерігатися і статична атаксія: хворий похитується з боку в бік, широко роставляє ноги, йому важко утримати рівновагу. Вегетативні порушення при менінгіті та менінгоенцефаліті можуть проявлятися дисоціацією між пульсом і температурою (уповільнення пульсу при підвищенні температури та прискорення його при нормальній температурі), аритмією, слабким наповненням пульсу, порушенням ритму та глибини дихання, ознаками підвищення лабільності вазомоторного апарату: при натисканні на шкіру з'являються червоні і білі плями, характерні плями Труссо (хворий то червоніє, то блідне).

При цьому, МБТ виявили у 45,2% випадків: у всіх цих пацієнтів за допомогою молекулярно-генетичного методу (GeneXpert MTB/Rif) спинно-мозкової рідини і/або харкотиння. Крім того, по одному випадку при бактеріоскопічному дослідженні ліквору і харкотиння отримали позитивні результати. Також, у вказаних пацієнтів діагноз підтвердили за допомогою культурального дослідження харкотиння (у 5 осіб) і ліквору (у 3 осіб). Двом пацієнтам виконали гістологічне дослідження біопсійного матеріалу бронха і ЛВ для встановлення специфічного характеру ураження.

3.2. Структура органних уражень та коморбідних станів у хворих на ВІЛ-асоційований туберкульозний менінгоенцефаліт

Установлено, що у 97% випадків клінічною формою у ВІЛ-позитивних був ТБМЕ, що у 86% поєднувався з ураженнями інших органів, легень у 88,9%, різних груп ЛВ – у 51,9%. Найчастіше діагностували ураження аксилярних 28,6% та мезентеріальних 21,4% ЛВ, а у 57,1% випадків виявили різне поєднання специфічного ураження кількох груп ПЛВ.

На процес діагностики специфічного ураження має вплив наявність супутньої патології, яка була у 80,7% випадків. Нерідко специфічний процес у пацієнтів на тлі ВІЛ/СНІД ускладнюється залізодефіцитною анемією (39,8%) і були випадки ішемічної хвороби серця (9,6 %), сепсис (6,5 %), перикардит (4,9 %), майже у кожного другого ВІЛ-позитивного пацієнта спостерігали неспецифічні захворювання органів дихання (табл. 1). При цьому у більшості пацієнтів діагностували респіраторну недостатність (90,3%) і майже у половини обстежених – хронічне обструктивне захворювання легень (ХОЗЛ).

Таблиця 1

Неспецифічні ураження дихальної системи при ко-інфекції ВІЛ/СНІД/ТБ

Супутня патологія	n= 31 хворий	
	абс.ч.	%
Респіраторна недостатність	28	90,3
Вірусна-бактеріальна пневмонія	6	19,7
Хронічний гнійний бронхіт	6	19,7
Хронічне обструктивне захворювання легень (ХОЗЛ)	14	45,2

При ко-інфекції ВІЛ/СНІД/ТБ ураження печінки проявлялось у вигляді хронічного гепатиту С (45,2%), цирозу печінки (22,6%), асцит (9,6%) і токсичного ураження печінки (6,5%) (табл. 2). Отже, як свідчать дані табл. 2 найчастіше у хворих з ко-інфекцією виявляли ураження печінки.

Таблиця 2

Частота уражень печінки при ко-інфекції ВІЛ/СНІД/ТБ		
Супутня патологія	n=31 хворий	
	абс.ч.	%
Хронічний гепатит С	14	45,2
Цироз печінки	7	22,6
Хронічний вірусний гепатит В	5	16,1
Токсичне ураження печінки	2	6,5
Асцит	3	9,6

Наші дослідження показали, що у хворих з ураженням мозкових оболонок і ЦНС на тлі ВІЛ-інфекції (рис. 17) спостерігали спастичну параплегію у 10 (32,1 %) пацієнтів, спастичну тетраплегію – 6 (19,5 %) і церебральний криптококоз – у 15 (48,4 %).

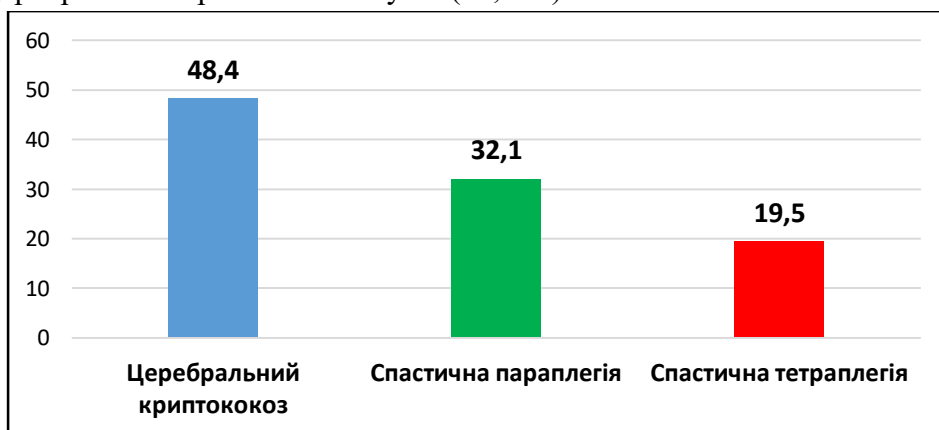


Рисунок 17. Частота ураження нервової системи у хворих ко-інфекцією ВІЛ/СНІД/ТБ, %

У таблиці 3 наведена частота ураження органів зору при ко-інфекції з ураженням мозкових оболонок і ЦНС на тлі ВІЛ-інфекції. Зокрема, найчастіше спостерігали фонову ретинопатію (38,7%) і ураження сітківки (32,2 %), а також астигматизм (19,4 %).

Таблиця 3

Частота ураження органів зору при ко-інфекції ВІЛ/СНІД/ТБ		
Ураження органів зору	n= 31 хворий	
	абс.ч.	%
Фонові ретинопатія	12	38,7
Герпесвірусне ураження очей	3	9,7
Астигматизм	6	19,4
Ураження сітківки очей і диску	10	32,2

У 80,7 % випадків, крім ко-інфекції ТБ/ВІЛ, була супутня патологія. Крім того, в 11 осіб (44%) спостерігали захворювання органу зору, у вигляді ангіопатії сітківки, атрофії зорового нерву, короткозорості. Майже у такої ж кількості (40%) діагностували панкреатит, холецистит. Також у 10 пацієнтів встановлена патологія кровотворної системи (анемія різного генезу, неходжківська

лімфома). В поодиноких випадках виявляли хвороби серцево-судинної, ендокринної систем, органу слуху, паразитарні захворювання, кахексію, наркоманію.

Більше половини (58,1%) пацієнтів мали встановлену групу інвалідності, з них під час перебування в спеціалізованому закладі 12 особам (66,7%) «оголосили» присвоєння групи в зв'язку з наявністю ознак тривалої втрати працездатності, решта 6 пацієнтів (33,3%) були комісовані з визнанням непрацездатними до вступу в стаціонар. Слід зазначити, що тільки 9 осіб (29%) працездатного віку були офіційно працевлаштовані, а хворіючи даною недугою в них виникли незворотні зміни, які привели до втрати працездатності і встановлення групи інвалідності.

3.3. Динаміка патоморфологічних змін туберкульозного менінгоенцефаліту

Зрушення в епідеміології ТБ тісно пов'язані зі змінами в структурі захворювання, морфологічними особливостями та клінічними проявами специфічного процесу. Це явище в клініці багатьох захворювань, зокрема ТБ, називають «патоморфозом»⁷³. Індукований, або терапевтичний, патоморфоз — це зміни хвороби, спричинені терапевтичними діями, найчастіше — впливом антимікобактеріальних препаратів при ТБ^{74,75,76,77}. Виділяють епідеміологічний, морфологічний і клінічний аспекти патоморфозу.

Через епідемію ВІЛ-інфекції в Україні також збільшується захворюваність на позалегеневі форми ТБ. Однією з найнебезпечніших форм ТБ у ВІЛ-інфікованих осіб є генералізована з ураженням ЦНС. У процесі генералізації ТБ розповсюджується на більшість органів і систем, зокрема ЦНС, органи черевної порожнини, печінку, селезінку, кишківник, хребет і суглоби. з позалегеневих форм переважно виявляють ураження лімфатичних системи (40,0%), плеври (18,2%) і ЦНС (7,3%). За даними багатьох вчених, останніми роками спостерігається збільшення частоти ТБМО і ЦНС у дорослих⁷⁸.

Перебіг ТБМ/МЕ у ВІЛ-інфікованих украї несприятливий, оскільки зазвичай виникає на тлі генералізації туберкульозної інфекції та розвитку гематогенного дисемінованого специфічного процесу^{79,80,81,82,83}. Як у дітей, так і у дорослих часто безпосередніми причинами смерті є

⁷³ Мельник В.П., Хурса Т.Г., Якимова Я.О., Солонинка Г.Я. Аналіз особливостей виявлення, діагностики та перебігу туберкульозу у хворих на ко-інфекцію туберкульоз/ВІЛ. Запорізький медичний журнал. 2017;19:5(104):604-608. Doi: 10.14739/2310-1210.2017.5.110163.

⁷⁴ Ніколаєва О.Д. Особливості діагностики позалегеневих форм туберкульозу у ВІЛ-інфікованих. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2018;3:33-3. doi: 10.30978/ TB2018-2-33.

⁷⁵ ¹⁰ Мельник В.П., Хурса Т.Г., Якимова Я.О., Солонинка Г.Я. Аналіз особливостей виявлення, діагностики та перебігу туберкульозу у хворих на ко-інфекцію туберкульоз/ВІЛ. Запорізький медичний журнал. 2017;19:5(104):604-608. Doi: 10.14739/2310-1210.2017.5.110163.

⁷⁶ Сахелашвілі М.І., Платонова І.Л., Штибель Г.Д. та ін. Частота і структура мультирезистентного туберкульозу і туберкульозу із розширеною резистентністю у дорослих Львівської області. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2017;1:36-41.

⁷⁷ Петренко В.І., Тодоріко Л.Д., Бойко А.В. Актуальні питання діагностики та лікування позалегеневого туберкульозу. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2013;3:86-94.

⁷⁸ Ніколаєва О.Д. Особливості діагностики позалегеневих форм туберкульозу у ВІЛ-інфікованих. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2018;3:33-3. doi: 10.30978/ TB2018-2-33.

⁷⁹ Ніколаєва О.Д. Особливості діагностики позалегеневих форм туберкульозу у ВІЛ-інфікованих. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2018;3:33-3. doi: 10.30978/ TB2018-2-33.

⁸⁰ Noraini PHILIP MSc, Timothy WILLIAM* MBBS, MRCP, and Daisy Vanitha JOHN MSc, PhD. Diagnosis of tuberculous meningitis: challenges and promises. Malaysian J Pathol 2015; 37(1) : 1 – 9.

⁸¹ Тлустова Т.В. Перебіг туберкульозного менінгоенцефаліту у ВІЛ-інфікованих пацієнт. Український пульмонолог. журнал. 2015, 2. Додаток. 13-14.

⁸² Marais S., Pepper D.J., Schutz C., Wilkinson R.J., Meintjes G. Presentation and Outcome of Tuberculous Meningitis in a High HIV Prevalence Setting. PLoS One. 2011;6(5):e20077. Doi: 10.1371/journal.pone.0020077.

⁸³ Рябоконь О.В., Ушеніна Н.С., Фурик О.О., Задирака Д.А.. Менінгеальний синдром в клініці інфекційних хвороб. набряк - набухання головного мозку (невідкладна допомога) : навчальний посібник для студентів 6 курсу медичних факультетів. Вид. 2-ге, доп. та перероб. - Запоріжжя : [ЗДМУ], 2021. 105 с.

туберкульозний менінгіт, менінгоенцефаліт та поліорганна недостатність⁸⁴. Однак характер морфологічних змін у померлих від ТБМО і ЦНС недостатньо вивчено, що набуває актуальності у зв'язку зі збільшенням кількості таких пацієнтів. Дані⁸⁵ свідчать, що незалежно від ВІЛ-статусу та стану імунної системи в усіх померлих від ТБМО і ЦНС спостерігається повнокрів'я та набряк головного мозку, периваскулярна лімфоїдна інфільтрація, значні зміни нервових клітин. У речовині мозку ВІЛ-інфікованих туберкульозних гранулом не знайдено, у ВІЛ-негативних вони траплялися рідко (11,1%). Вивчення особливостей патоморфозу ТБМО і ЦНС провели на підставі аналізу секційного матеріалу за 55 років (1948—1998 і 2020—2024). При цьому, проаналізували 179 файлів медичної документації дорослих хворих, які померли від ТБМО і ЦНС. Всім померлим проводили аналіз гістологічного, морфологічного, біопсійного/резекційного матеріалу та інші необхідні обстеження ГМ та інших органів і систем. Досліджувані роки поділили на 6 періодів: 1-й – 1948-1957, 2-й – 1958-1967, 3-й – 1968- 1977, 4-й – 1978-1987, 5-й – 1988-1998, 6-й – 2020-2024pp. Ці дослідження дозволили встановити патоморфологічні особливості проявів та причин летальності хворих в стаціонарних умовах в динаміці за різні періоди лікування і смерті пацієнтів.

Зокрема, у доантибактеріальному періоді тільки впроваджувались АМБП в практичну діяльність лікувальних установ, 2, 3, 4-й періоди – стали застосовувати комплексну специфічну терапію, головним чином, ізоніазид, стрептоміцин, парааміносаліцилова кислота (ПАСК), в 5-ому періоді комплексна АМБ терапія здійснювалась препаратами (ізоніазид, рифампіцин, етамбутол, протіонамід, аміноглікозиди і інші), у 6-му періоді відбувається удосконалення протитуберкульозної терапії з впровадженням нових методів діагностики та схем лікування з використанням сучасних АМБП (бедаквілін, лінезолід, клофазимін, деламанід, циклосерин, претоманід тощо), які призначались лише перорально.

Наші дослідження свідчать (табл. 4), що у першому періоді від ТБМ померло 79 (44,1 %) пацієнтів, у 2-ому – 18 (10,0 %), у 3-ому – 3 (1,7 %), у 4-ому – 3 (1,7 %), у 5-ому – 9 (5,0 %) і у 6-ому періоді – 67 (37,5 %). Отже, частота розтинів з причини смерті від даного захворювання до 5-ого періоду з роками поступово зменшувалась (з 44,1 % до 1,7 %; $p < 0,001$), а у 5-ому періоді (1988-1998 pp.) вірогідно збільшилась порівняно з 3-ім і 4-им періодами (з 1,7 % до 5,0 %; $p < 0,05$). У 6-ому періоді, тобто в наш час, вірогідно збільшилась частота смертності від ТБМ/МЕ (у середньому до $37,5 \pm 1,9$ %).

Таблиця 4

Частота розтинів з причини смерті від туберкульозного менінгіту і ЦНС за періоди/роки

Періоди/роки	абс.ч n=179 хворих	%
1-й (1948-1957 pp.)	79	44,1
2-й (1958-1967 pp.)	18	10,0
3-й (1968-1977 pp.)	3	1,7
4-й (1978-1987 pp.)	3	1,7
5-й (1988-1998 pp.)	9	5,0
6-й (2020-2024 pp.)	67	37,5

⁸⁴ Піскур З.І., Костик О.П., Сахелашвілі М.І. та ін. Позалегеновий туберкульоз у дітей: вікові особливості та медикаментозна резистентність збудника. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2022;4:22-9. doi: 10.30978/TB2022-4-22.

⁸⁵ Корж О.В., Тлустова Т.В., Джеджеїа Т.В., Садовнік Є.Є. Особливості морфологічної картини туберкульозного менінгоенцефаліту у ВІЛ-інфікованих. Туберкульоз, легеневі хвороби, ВІЛ-інфекція. 2014;1:13-8.

Отже, у сучасному періоді (2020-2024рр) у 80,6 % (54) померлих, ТБМО і ЦНС розвинувся на тлі ВІЛ/СНІД-інфекції і лише у 19,4 % (13) ВІЛ-інфекція не була діагностована. За періоди 1948-1998, 2020-2024рр. (55 років) серед померлих було 108 (60,3%) чоловіків, 71 (39,7%) – жінок. У перших п'яти періодах більшість хворих (70,5 %) померли у молодому віці – до 30 років (18-20 р. – 36,6 %, 21-25 р. – 25,0 %, 26-30 р. – 8,9 %). В осіб понад 40 років летальність від ТБМО і ЦНС відмічалась рідше (41-45р. – 2,7 %, 46- 50 р. – 4,5 %, 51-55р. – 5,5 %, 56-60 р. – 5,4 %, і понад 60 р. – 3,5 % (рис.18)). Проте, у 6-ому періоді пік летальності у стаціонарі серед хворих на ко-інфекцією ВІЛ/СНІД/ТБ констатовано у віковій групі від 39 до 50 років (43,3%).

Таким чином, у 6-ому періоді спостерігали в 7,4 раза ріст частоти летальності у стаціонарі від ураження МО і ЦНС порівняно з 5-м періодом (67 випадків проти 9 випадків), і у 6-ому періоді порівняно з 5-им подібна закономірність констатували серед осіб померлих у молодому віці (55,6 % проти 7,4 %; $p<0,01$).

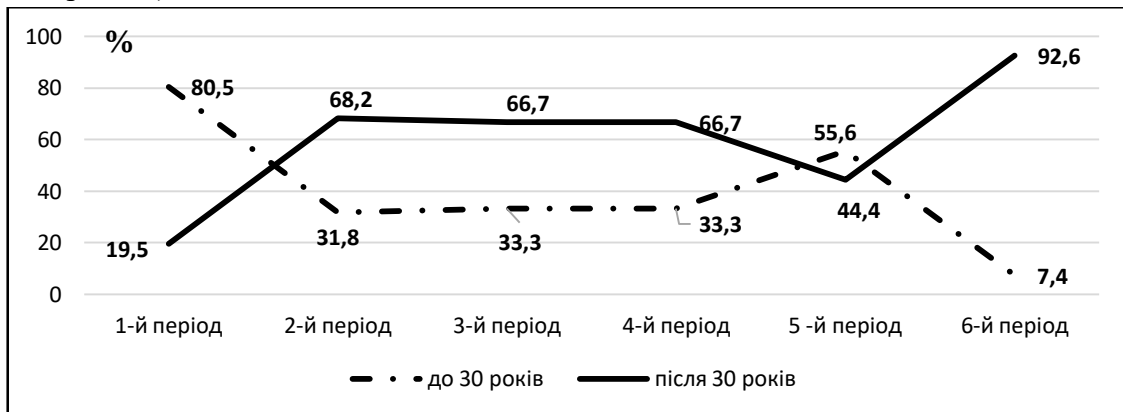


Рисунок 18. Вікова структура померлих

Максимальна частота випадків смерті констатовано у віці 20 – 25 років. Дані рис. 18 свідчить, що з роками вірогідно зменшувалась кількість летальних випадків до 30 років, і збільшувалась після 30 років.

У другому періоді пік померлих констатовано у віковій групі – 30-40 років, у 3-ому і 4-ому періодах, летальність була однакова у вікових групах до 30 років, 31-40 років і 41-60 років. У 5-ому періоді пік летальності спостерігали у віковій групі до 30 років, а у 6-ому у віковій групі 40-60 років. Найменша кількість померлих констатовано майже у всіх періодах у віковій групі після 60 років.

Протягом 1948-1957 рр. ТБМО і ЦНС на аутопсії діагностували у 79 дорослих (табл.5). Частіше всього його виявляли серед померлих у молодому віці (до 30 років – 80,5 %) і рідше понад 40 років (19,5 %). У наступному періоді кількість померлих зменшилась 4,4 рази (з 79 до 18 випадків), при цьому у молодому віці лише померли 27,7% (5 із 18). Ці дані свідчать про вірогідне зменшення випадків смерті у молодому віці (з 80,5 % до 31,8%; $p<0,01$) і різке збільшення летальності після 40 років (з 19,5 % до 68,2 %; $p<0,01$).

Таблиця 5

Вікова структура померлих залежно від періодів дослідження (%)

Вік померлих	Періоди /померли (абс.ч/%)					
	1-й (79)	2-й (18)	3-й (3),	4-й (3)	5-й (9)	6-й (67)
До 30 р.	64 (80,5 %)	5 (27,7 %)	1 (33,3%)	1 (33,3%)	5 (55,6%)	5 (7,4%)
31-40 р.	8 (10,3%)	6 (33,3%)	1 (33,4%)	1 (33,4%)	2 (22,2%)	18 (26,9%)
41-60 р.	5 (6,5%)	5 (27,7%)	1 (33,3%)	1 (33,3%)	1 (11,1%)	29 (43,3%)
Понад 60 р.	2 (2,7%)	2 (11,3%)	–	–	1 (11,1%)	15 (22,4%)

У 3-ому і 4-ому періодах продовжувалась тенденція до зменшення числа померлих до 30 років і збільшення – після 40 років. У 5-ому періоді вікова структура померлих у молодому віці в 1,6 раза збільшилась (з 33,3% до 55,6%; $p>0,05$) порівняно з 4 періодом. У 6-ому періоді суттєво збільшилась частота летальності у віковій групі 40-50 рр. і становила 43,3 % (29 померлих).

Наші дослідження показали, що тільки у 2 (1,1 %) померлих від даного захворювання на аутопсії не були знайдені специфічні вогнища в легенях. Водночас, у 177 (98,9 %) хворих ТБМ і ЦНС виник внаслідок прогресування процесу з легень і ЛВ. При цьому, найчастіше діагностували міліарний ТБ з ураженням інших органів (97,8 %) і ТБ периферичних або ВГЛВ (2,2 %).

У доантибактеріальному періоді у 35 (44,3 %) із 79 померлих специфічні зміни МО виникали внаслідок прогресування первинного туберкульозного комплексу, у 34 (43,0 %) – ВГЛВ, у 3 (3,8 %) – казеозної пневмонії, у 2 (2,5 %) – фіброзно-кавернозного ТБ легень, по одному випадку процес розвинувся з вогнищового, дисемінованого, циротичного і ТБ периферичних лімфатичних вузлів. У цьому періоді на аутопсії у померлих від ТБМ і ЦНС у 84,8 % (66) випадків виявляли тотальний казеоз ВГЛВ. При цьому, частіше туберкульозні зміни визначали в бронхопульмональних, паратрахеальних і біфуркаційних вузлах. У 7 (8,9 %) померлих одночасно з казеознозміненими лімфатичними вузлами виявляли і старі звапнені вузли середостіння, у 10 (12,7 %) констатована розповсюджена форма ураження лімфатичних вузлів (периферичних, внутрішньогрудних і мезентеріальних). При цьому, ТБМ у 45 (56,9 %) із 79 хворих виник на тлі гостроперебігаючого специфічного процесу, а у 34 (43,1 %) – хронічного, при цьому серед останніх переважала хронічна форма первинного туберкульозу. Отже, у 1-ому періоді ТБМ у більшості хворих розвивався внаслідок прогресування первинного туберкульозу (рис. 19). До того ж, джерелом генералізації у більшості з них були казеознозміннені лімфатичні вузли.

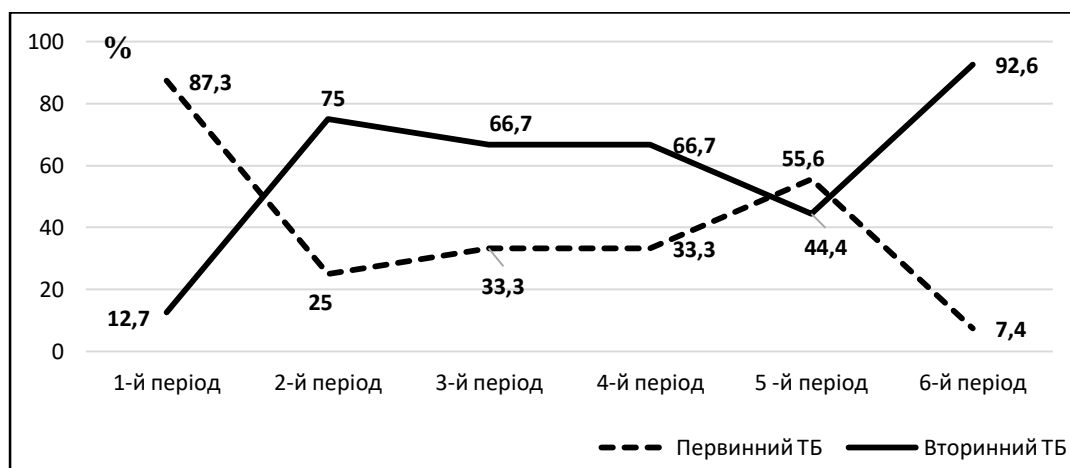


Рисунок 19. Частота прогресування первинного і вторинного туберкульозу у дорослих залежно від періодів (%)

У наступних 2-х періодах встановлено зменшення смерті від ТБМ, який розвився від прогресування первинного ТБ органів дихання (25 % і 33,3 % проти 87,3 %; $p<0,05$) і збільшення – від вторинного (75,0 % і 66,7 % проти 12,7 %; $p<0,05$). Разом з тим, починаючи з 5-ого періоду, констатована повторна хвиля росту частоти ТБМО і ЦНС серед хворих внаслідок прогресування первинних форм специфічного процесу, а у наступні роки – туберкульозу вторинного генезу. Особливо збільшилась частота смерті від ТБМО і ЦНС при прогресування специфічного процесу вторинного генезу (12,5 раза). У всіх періодах хворі з туберкульозним менінгітом і ЦНС поступали

в гострій фазі процесу (ургентно – 76,1 %). У першому і другому періодах більшість хворих помирали у перші дні перебування у стаціонарі (89,7 %). У 3-5 періодах 59,7 % хворих на туберкульозний менінгіт і ЦНС помирали протягом 2-3 тижнів (60,0 %). У 6-ому періоді протягом першого тижня перебування у стаціонарі померло 37,3 % 25) хворих, у яких був діагностований ТБМО і ЦНС на тлі ВІЛ-інфекції.

У більшості померлих у 1-ому періоді від ТБМО і ЦНС констатовано одночасне ураження легень, мозкових оболонок і інших органів. Зокрема, туберкульоз мозкових оболонок поєднувався з ураженням легень (98,9 %), селезінки (44,3 %), нирок (29,1 %), печінки (27,8 %), яєчників (6,3 %), кишківника (5,1 %), перикарда (3,8 %) і наднирників (94,8 %). Одночасне ураження 5-ти і більше органів встановлено у 75 (94,9 %) померлих. У 6-ому періоді лише у 9 (13,4 %) із 67 померлих констатували ураження легень, проте частіше діагностували ізольоване ураження МО і ЦНС без патологічних змін в легенях. У наступні роки спостерігали зменшення частоти і розповсюдженості специфічного процесу з ураженням лише 3-х внутрішніх органів черевної порожнини (частіше всього печінки – 45,7 %, селезінки – 53,4 % і нирок – 39,2 %). Проте, з кожним роком збільшувалась частота дистрофічних змін у паренхіматозних органах (з 16,5 % до 87,5 %; $p < 0,001$). Наші дослідження показали, що у 1-ому і 2-ому періодах переважала базиллярна форма туберкульозного менінгіту (87 – 89,9 %) із 97 померлих. Проте у 10 (10,3 %) померлих на аутопсії діагностували туберкульозний менінгіт і менінгоенцефаліт, у 1 (0,9 %) – спинальну форму менінгіту, у 7 (6,3 %) – солітарні туберкульози в мозку. У наступні роки спостерігали зменшення базиллярної форми менінгіту (68,7 %) і збільшення поєднання туберкульозу мозкових оболонок з ЦНС (77,8 %).

Щодо ускладнень, які розвивались, то у першому періоді серед померлих від туберкульозу мозкових оболонок і ЦНС у 5 (4,5 %) на аутопсії було виявлено розм'якшення мозкової речовини, у 17 (15,2 %) – гідроцефалія, у 6 (5,4 %) – набряк мозку, у 12 (10,7 %) – зміни у кровоносних судинах мозку. Вищеперераховані зміни частіше констатували у хворих, які померли в 1-ому і 2-ому періодах і вірогідно рідше – у 3-ому і 4-ому періодах. Разом з тим, у 5-ому і 6-ому періодах (особливо у 6-ому періоді), коли специфічний процес розвивався на тлі ВІЛ-інфекції, спостерігали повторну хвилю збільшення масивності і розповсюдженості специфічного ураження мозкових оболонок і ЦНС та інших органів. Починаючи з 5-ого періоду, констатована повторна хвиля росту частоти туберкульозу мозкових оболонок і ЦНС серед хворих внаслідок прогресування первинних форм ТБ (у 5-ому – 55,6 % проти 33,3 %; $p < 0,05$). При цьому виникненню туберкульозного менінгіту найчастіше сприяло прогресування специфічного процесу з внутрішньогрудних лімфатичних вузлів. Проте у 6-ому періоді (2020-2024рр.) у 7,4 раза зменшилася частота смерті внаслідок прогресування первинного ТБ у дорослих порівняно з 5-им періодом (7,4 % проти 55,6 %; $p < 0,001$), і в 12,5 раза збільшилась летальність від туберкульозу мозкових оболонок і ЦНС вторинного генезу (92,6 % проти 7,4 %; $p < 0,001$).

Отже, наші дослідження показали, що у перші три періоди туберкульоз мозкових оболонок і ЦНС у більшості хворих розвивався внаслідок прогресування первинних форм специфічного процесу, а у наступні роки – туберкульозу вторинного генезу. Особливо збільшилась частота смерті від туберкульозу мозкових оболонок і ЦНС при прогресуванні специфічного процесу вторинного генезу (12,5 раза, рис. 20).

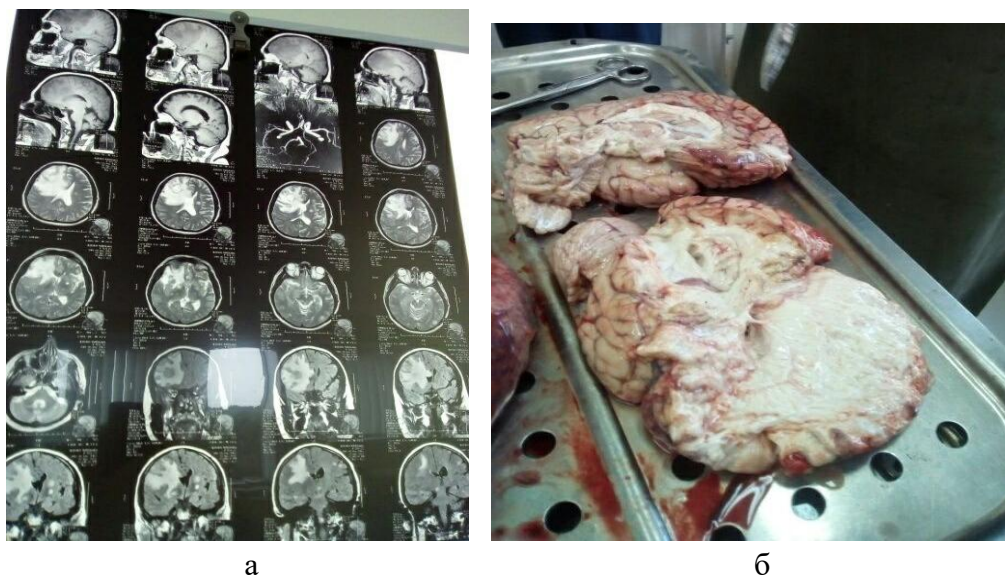


Рисунок 20. Компютерна томографія мозку при туберкульозному менінгоенцефаліті (а). Макропрепарат. Туберкульозний менінгоенцефалит з конгломератними казеозними вогнищами у паренхімі мозку (б)

При ускладненому перебігу менінгоенцефаліту виникали конгломератні казеозні вогнища, які утворювались у паренхімі мозку. При цьому, вони формувались у будь-якому місці ГМ, проте найчастіше мали схильність до підкіркових структур. Розташовані в центрі активні ураження досягали значного розміру.

За умов слабкої резистентності пацієнта цей процес може призвести до вогнищевих ділянок запалення або утворення відвертого абсцесу, але звичайним перебігом є злиття казеозних вогнищ та утворення фіброзної капсули, що призводить зрештою до формування туберкуломи (рис.21). Однак, при звичайному перебігу процесу відбувалися злиття казеозних вогнищ та утворення фіброзної капсули, що призводило зрештою до формування туберкуломи.



Рисунок 21. Макропрепарат. Туберкульозний абсцес мозку

Найчастішими ускладненнями і опортуністичними захворюваннями у хворих на тлі ко-інфекції були: набряк ГМ (31,1 %), церебральний параліч (12,2 %), лейкоенцефалопатія (13,4 %), кандидоз (31,3 %), респіраторна недостатність (23,9 %), ураження печінки (23,9 %), інтоксикація і кахексія (61,2 %) і токсоплазмоз і цитомегаловірус (18,0 %) тощо.

Наші дослідження свідчать, що у сучасних умовах (6-й період), коли ТБ мозкових оболонок і ЦНС розвивалися на тлі ВІЛ/СНІД-інфекції найчастіше виявляли периваскулярну лімфоїдну інфільтрацію і не виявляли у мозку туберкульозних гранулом, крім цього у м'яких мозкових оболонках і головному мозку констатували наявність численних васкулітів і тромбоваскулітів, фібринозно-гнійних нашарувань на мозкових оболонках, що сприяло виникненню зон демієлінізації і розм'якшення мозкової тканини.

Таким чином, у доантибактеріальному періоді більшість хворих померли від розповсюджених форм ТБ з масивним ураженням багатьох органів і систем. При цьому, більшість з них помирали у молодому віці. У 2-ому – 4-ому періодах, коли стали застосовувати комплексну антимікробактеріальну терапію, спостерігали значне зменшення летальності від ТБ органів дихання з ураженням мозкових оболонок і ЦНС.

За останні 5 років (2020-2024 рр.) істотну роль зіграв у патоморфозі туберкульозного менінгіту і менінгоенцефалиту ріст числа хворих з ВІЛ/СНІД-інфекцією. Водночас, наші дослідження свідчать, що внаслідок поступового удосконалення хіміотерапії з роками відбувався індукований (медикаментозний) патоморфоз, який суттєво змінив перебіг специфічного процесу у мозкових оболонках і ЦНС у дорослих.

4. ОБГОВОРЕННЯ

Отже, упродовж перших трьох досліджуваних періодів ТБМО і ЦНС у більшості пацієнтів розвивався внаслідок прогресування первинних форм специфічного процесу, тоді як у наступні роки переважали випадки вторинного генезу туберкульозу. Особливо помітним стало зростання частоти летальних наслідків при прогресуванні вторинного специфічного процесу — у 12,5 разів. Упродовж аналізованих періодів відбулися зміни й у віковій структурі померлих від туберкульозного менінгіту. Так, у першому періоді переважна більшість хворих (85,0 %) помирали у молодому віці (до 30 років). Надалі спостерігалось поступове збільшення віку померлих, що супроводжувалося зростанням частоти прогресування специфічного процесу вторинного генезу.

У першому та другому періодах домінувала базиллярна форма ТБМ (87,0–89,9%). Водночас у 10 (10,3%) померлих за результатами аутопсії було діагностовано туберкульозний менінгіт і менінгоенцефаліт, у 1 (0,9 %) — спинальну форму менінгіту, а у 7 (6,3 %) — солітарні туберкуломи головного мозку. У наступні роки відзначалося зменшення частоти базиллярної форми менінгіту (до 68,7 %) та збільшення випадків поєданого ураження МО і ЦНС (до 77,8%). При цьому ТБМ дедалі частіше супроводжувався генералізованим ураженням легень та інших органів і систем, особливо у шостому періоді дослідження.

Аналіз результатів за останні 55 років свідчить про суттєві зміни перебігу ТБМО і ЦНС у дорослих, зумовлені переважно індукованим патоморфозом. Це проявлялося достовірним зменшенням частоти летальних випадків від даного захворювання — з 44,1 % у першому періоді до 1,7 % у третьому–четвертому періодах, із подальшим зростанням до 5,0 % у п'ятому та різким підвищенням до 37,5 % у шостому періоді. На тлі поширення ко-інфекції ВІЛ/ТБ цей показник зростав до 80,6 %.

Таким чином, туберкульоз у ВІЛ-позитивних осіб і надалі залишається однією з актуальних медико-соціальних проблем як в Україні, так і у світі. Пандемія коронавірусної хвороби сприяла підвищенню захворюваності на ВІЛ-інфекцію, туберкульоз та їх поєднання^{23, 27}. У нашому дослідженні встановлено, що найпоширенішою клінічною формою був туберкульозний менінгоенцефаліт, який переважно поєднувався з дисемінованими та міліарними ураженнями

органів дихання. Серед позалегенових локалізацій найчастіше діагностували туберкульоз периферичних лімфатичних вузлів, що узгоджується з даними В.П. Мельника та співавторів⁸⁶.

У порівняльному аналізі клініко-епідемічної ситуації щодо ко-інфекції ВІЛ/ТБ у Києві автори також наголошують на значній частці генералізованих і позалегенових форм туберкульозу^{9, 11}, які характеризуються складністю своєчасної діагностики, що підтверджується і результатами нашого дослідження. Майже у кожного другого ВІЛ-позитивного пацієнта етіологічне підтвердження туберкульозного процесу здійснювали молекулярно-генетичними методами. Клінічна картина та перебіг туберкульозного менінгоенцефаліту у ВІЛ-позитивних пацієнтів характеризуються значним поліморфізмом патоморфологічних змін і залежать від багатьох чинників. Поглиблення проблеми поєднання двох соціально значущих інфекцій на сучасному етапі визначає необхідність посилення боротьби з ними як важливого компонента контролю епідемічної ситуації у світі та в Україні. Це є невід'ємною складовою комплексної медичної допомоги, догляду та підтримки пацієнтів, особливо в умовах воєнного стану в Україні.

ВИСНОВКИ

Унаслідок патоморфозу специфічного процесу на тлі ВІЛ/СНІД-інфекції найчастіше діагностували дисемінований та міліарний туберкульоз легень. У м'яких мозкових оболонках і тканині головного мозку виявляли виражену периваскулярну лімфоїдну інфільтрацію, численні васкуліти й тромбоваскуліти, а також фібринозно-гнійні нашарування, що сприяло формуванню зон демієлінізації та розм'якшення мозкової тканини. Водночас у речовині головного мозку значно рідше визначали туберкульозні гранульоми. Важкість перебігу туберкульозного процесу обумовлюється поєднанням змін в легенях, мозкових оболонках, тканині мозку та ускладнень. Усі зазначені чинники зумовлювали тяжкий перебіг захворювання, що призводило до стійкої втрати працездатності та інвалідизації більш ніж у половини пацієнтів (54,8%), а в значній частини випадків — до летального наслідку (29,0%).

⁸⁶ Мельник В.П., Хурса Т.Г., Якімова Я.О., Солонинка Г.Я. Аналіз особливостей виявлення, діагностики та перебігу туберкульозу у хворих на ко-інфекцію туберкульоз/ВІЛ. Запорізький медичний журнал. 2017;19:5(104):604-608. Doi: 10.14739/2310-1210.2017.5.110163.

ПОСТТРАВМАТИЧНИЙ СТРЕСОВИЙ РОЗЛАД, ЦУКРОВИЙ ДІАБЕТ 2 ТИПУ І ВІТАМІН В12

POST-TRAUMATIC STRESS DISORDER, TYPE 2 DIABETES, AND VITAMIN B12

Сергієнко Вікторія Олександрівна, доктор медичних наук, професор кафедри ендокринології, проректор з наукової роботи, Державне некомерційне товариство “Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького”, serhiyenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6414-0956>

Сергієнко Олександр Олексійович, доктор медичних наук, професор кафедри ендокринології, Державне некомерційне товариство “Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького”, serhiyenkoa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7519-2279>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.17>

Анотація. Посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) – це виснажливий психічний розлад, що формується внаслідок впливу травматичних подій. ПТСР асоціюється з підвищеним ризиком розвитку низки метаболічних розладів, зокрема таких, як цукровий діабет (ЦД) 2 типу, інсулінорезистентність (ІР), ожиріння, дисліпідемія (ДЛП) та артеріальна гіпертензія. Патофізіологічні процеси, що об'єднують ПТСР із розвитком ЦД 2 типу, ймовірно, включають дисфункцію регуляції гіпоталамо-гіпофізарно-адrenalової вісі, оксидативний стрес (ОС), хронічне запалення низької інтенсивності (ХЗНІ), ІР, симпато-адrenalової системи, змін стану вегетативної нервової системи, інших метаболічних порушень, а також значний психологічний тягар. Ці процеси можуть суттєво впливати на порушення толерантності до глюкози (ПТГ), сприяти розвитку ЦД 2 типу та підвищувати ризики виникнення серцево-судинних захворювань (ССЗ). Порушення шляху одновуглецевого (1С) метаболізму є біологічно обґрунтованим механізмом, який відіграє ключову роль у патофізіології ПТСР, ЦД 2 типу та ССЗ. Цей процес регулює метаболізм гомоцистеїну (homocysteine, Нсу) й залежить від належного рівня фолатів та вітаміну В12. Крім того, підвищений рівень прозапальних цитокінів, що спостерігається у пацієнтів з ПТСР, сприяє дисфункції β-клітин та ПТГ. Вітамін В12 відіграє важливу роль у метаболізмі Нсу, функціонуванні центральної нервової системи та підтриманні фізіологічного перебігу когнітивних процесів. Зокрема, дефіцит ціанокобаламіну пов'язаний із підвищеним ризиком нейропсихіатричних та кардіометаболічних захворювань. Отже корекція дефіциту ціанокобаламіну може бути перспективним допоміжним підходом у лікуванні пацієнтів із ПТСР та коморбідним ЦД 2 типу. Докази зв'язку між з ПТСР і ЦД 2 типу та ціанокобаламіном відкривають можливість дослідження використання препаратів вітаміну В12 як профілактичної терапії цих захворювань або їх ускладнень.

Ключові слова: посттравматичний стресовий розлад, цукровий діабет 2 типу, вітамін В12, огляд літератури

Abstract. Post-traumatic stress disorder (PTSD) is a debilitating mental health condition that develops as a result of exposure to traumatic events. PTSD is associated with an increased risk of developing several metabolic disorders, including type 2 diabetes (T2D), insulin resistance (IR), obesity, dyslipidemia (DLP), and hypertension. The pathophysiological processes linking PTSD to the development of type 2 diabetes likely include dysfunction of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis, oxidative stress

(OS), low-grade chronic inflammation (LGCI), IR, dysfunction of the sympathetic-adrenal system, changes in the autonomic nervous system, and other metabolic disorders, as well as significant psychological distress. These processes can significantly influence impaired glucose tolerance (IGT), contribute to the development of T2D, and increase the risk of cardiovascular disease (CVD). Disruption of the one-carbon (1C) metabolic pathway is a biologically sound mechanism that plays a key role in the pathophysiology of PTSD, T2D, and CVD. This process regulates homocysteine (Hcy) metabolism and depends on adequate levels of folates and vitamin B12. Additionally, the elevated levels of pro-inflammatory cytokines observed in patients with PTSD contribute to β -cell dysfunction and IGT. Vitamin B12 plays an important role in Hcy metabolism, the functioning of the central nervous system, and the maintenance of normal cognitive processes. In particular, cyanocobalamin deficiency is associated with an increased risk of neuropsychiatric and cardiometabolic diseases. Therefore, correcting cyanocobalamin deficiency may be a promising adjunctive approach in the treatment of patients with PTSD and comorbid type 2 diabetes. Evidence of a link between PTSD and type 2 diabetes and cyanocobalamin will open up the possibility of studying the use of vitamin B12 preparations as a preventive therapy for these diseases or their complications.

Keywords: post-traumatic stress disorder, type 2 diabetes, vitamin B12, literature review

ВСТУП

Посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) – виснажливий психічний розлад, спричинений переживанням травматичних подій, вражає приблизно 3,9 % населення світу, причому вищі показники поширеності спостерігаються серед ветеранів бойових дій (ВБД) та в регіонах, що зазнали конфліктів¹. Водночас цукровий діабет (ЦД) 2 типу досяг масштабів епідемії та охопив понад 537 млн дорослих у всьому світі². ПТСР та ЦД 2 типу є важливими викликами для системи охорони здоров'я і все більше даних свідчать про наявність двостороннього зв'язку між ними^{3,4}. Результати досліджень вказують на те, що особи з ПТСР мають значно підвищений ризик розвитку ЦД 2 типу, а метааналізи повідомляють про 30-50% підвищення частоти захворювання порівняно з популяціями без ПТСР⁵. Зв'язок залишається сталим навіть після врахування традиційних факторів ризику, таких як ожиріння та недостатня фізична активність. Це вказує на те, що ПТСР може самостійно впливати на вуглеводний обмін через нейроендокринні та запальні механізми⁶.

На основі даних, які вказують на зв'язок між ПТСР та дисбаланс у механізмах регуляції фізіологічних реакцій на стрес, дедалі більше дослідників фокусуються на ролі прозапальних і метаболічних шляхів. Ці процеси можуть суттєво впливати на порушення вуглеводного обміну, сприяти розвитку ЦД 2 типу та підвищувати ризики виникнення серцево-судинних захворювань

¹J. Song, 'Post-Traumatic Stress Disorder and Cardiometabolic Dysfunction: Molecular Mechanisms and Therapeutic Targets', *iScience*, vol. 29, no. 4, 2026, 115447.

²V.A. Serhiyenko and A.A. Serhiyenko, 'Diabetic Cardiac Autonomic Neuropathy', in J. R. Rodriguez-Saldana, (ed.), *The Diabetes Textbook: Clinical Principles, Patient Management and Public Health Issues*, Basel, Springer, Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019, pp. 825-850.

³Y. Yu et al., 'Effect of Post-Traumatic Stress Disorder on Type 2 Diabetes and the Mediated Effect of Obesity: A Mendelian Randomization Study', *Frontiers in Endocrinology*, vol. 15, 2024, 1375068.

⁴N. Aleid et al., 'A Systematic Review of the Bidirectional Relationship Between Post-Traumatic Stress Disorder (PTSD) and the Development of Type 2 Diabetes', *Cureus*, vol. 29, no. 9, 2025, e93457.

⁵J. Salas et al., 'Severity of Posttraumatic Stress Disorder, Type 2 Diabetes Outcomes and All-Cause Mortality: A Retrospective Cohort Study', *Journal of Psychosomatic Research*, vol. 175, 2023, 111510.

⁶N. Aleid et al., 'A Systematic Review of the Bidirectional Relationship Between Post-Traumatic Stress Disorder (PTSD) and the Development of Type 2 Diabetes', *Cureus*, vol. 29, no. 9, 2025, e93457.

(ССЗ)^{7,8}. Зокрема, порушення шляху одноуглецевого (1C) метаболізму (фолат-залежного метаболізму одноуглецевих фрагментів) є біологічно обґрунтованим механізмом, який відіграє ключову роль у патофізіології ПТСР, ЦД 2 типу та ССЗ. Цей процес регулює метаболізм гомоцистеїну (homocysteine, Hcy) й залежить від належного рівня фолатів та вітаміну В12⁹.

Вітамін В12 (ціанокобаламін, кобаламін) відіграє важливу роль у патогенезі порушень толерантності до глюкози (ПТГ), причому його рівень зазвичай знижується зі збільшенням тяжкості ПТГ^{10,11}. Відомо також, що дефіцит ціанокобаламіну асоціюється з підвищеним ризиком розвитку гестаційного діабету¹². Результати недавнього дослідження демонструють, що додаткове застосування препаратів вітаміну В12 може сприяти покращенню глікемічного контролю та зменшенню інсулінорезистентності (ІР) у пацієнтів із ЦД 2 типу¹³. Крім того, повідомляється, що у хворих на ЦД 2 типу рівень фруктозаміну має значну кореляцію з концентрацією ціанокобаламіну у сироватці крові. Це може свідчити про можливий зв'язок між рівнем вітаміну В12 та якістю глікемічного контролю.

Метою даного огляду було узагальнити сучасні дані про особливості взаємозв'язків між ПТСР, ЦД 2 типу та вітаміном В12, а також визначення перспективних напрямів подальших досліджень у цій галузі.

МЕТОДОЛОГІЯ

Пошук проводився у базах даних PubMed/Medical Literature Analysis and Retrieval System Online (MEDLINE), Excerpta Medica (Embase), PsycINFO та Web of Science. Використано ключові слова: “посттравматичний стресовий розлад”, “цукровий діабет 2 типу”, “вітамін В12”. Для виявлення результатів дослідження, які не вдалося знайти під час онлайн-пошуку, використовувався ручний пошук бібліографії публікацій.

ПОСТТРАВМАТИЧНИЙ СТРЕСОВИЙ РОЗЛАД І ЦУКРОВИЙ ДІАБЕТ 2 ТИПУ

Зв'язок між ПТСР та ЦД 2 типу вивчався з біологічної, психологічної та поведінкової точок зору. Обсерваційні дослідження взаємозв'язку між ПТСР та ЦД 2 типу можуть містити фактори, що спотворюють результати. Проте в ході 22-річного проспективного дослідження частота випадків ЦД 2 типу все одно асоціювалася з симптомами ПТСР за принципом “доза-реакція” навіть після коригування на ІМТ та інші фактори ризику¹⁴. Згідно з повідомленнями, навіть після врахування супутнього явища депресії у внутрішньо переміщених осіб (ВПО) із ПТСР, у них все одно відзначається підвищена частота діагностування ЦД 2 типу¹⁵. Особливі фактори ризику

⁷ V.A. Serhiyenko et al., ‘Posttraumatic Stress Disorder, Metabolic Syndrome, and the Autonomic Nervous System’, Endokrynologia, vol. 28, no. 4, 2023, pp. 377-392.

⁸ M. Al Qassab et al., ‘One-Carbon Metabolism and Cardiovascular Disease: Molecular Mechanisms, genetic Influences, and Epigenetic Regulation’, Biochemistry and Biophysics Reports, vol. 46, 2026, 102544.

⁹ M. Al Qassab et al., ‘One-Carbon Metabolism and Cardiovascular Disease: Molecular Mechanisms, genetic Influences, and Epigenetic Regulation’, Biochemistry and Biophysics Reports, vol. 46, 2026, 102544.

¹⁰ J. Liu et al., ‘Research Progress on the Relationship between Vitamins and Diabetes: Systematic Review’, International Journal of Molecular Sciences, vol. 24, no. 22, 2023, 16371.

¹¹ E.S. Neal et al., ‘Vitamin B12 Deficiency Induces Glucose Intolerance, Delays Peak Insulin Levels and Promotes Ketogenesis in Female Rats’, The Journal of Endocrinology, vol. 256, no. 2, 2023, e220158.

¹² X. Liu et al., ‘Associations of Maternal Serum Folate, Vitamin B12 and Their Imbalance With Gestational Diabetes Mellitus: The Mediation Effects of the Methionine Cycle Related Metabolites’, Clinical Nutrition (Edinburgh, Scotland), vol. 48, 2025, pp. 50-59.

¹³ U.P. Singh et al., ‘Association of Vitamin B12 and Vitamin D Levels with Glycemic Control in Patients with Type 2 Diabetes Mellitus’, International Journal of Preventive Medicine, 16, 2025, 84.

¹⁴ Y. Song et al., ‘Causal Associations Between Posttraumatic Stress Disorder and Type 2 Diabetes’, Diabetology & Metabolic Syndrome, vol. 17, no. 1, 2025, 63.

¹⁵ A. AlRefaie and C. Dowrick, ‘Causes and Risk Factor of Post-Traumatic Stress Disorder in Adult Asylum Seekers and Refugees’, Psychiatry International, vol. 2, no. 4, 2021, pp. 410-423.

спостерігаються серед ВБД та населення, що зазнало наслідків збройних конфліктів. Дослідження систематично демонструють підвищену частоту ЦД 2 типу у ветеранів війни з ПТСР у порівнянні з цивільними¹⁶. Крім того, обстеження в районах бойових дій, наприклад, серед українських ВБД та ВПО, підкреслюють вплив хронічного стресу. Ці групи населення демонструють помітно вищий рівень стресу, пов'язаного з діабетом, а також незадовільні метаболічні показники. У систематичному огляді, проведеному N. Aleid et al., підсумовано сучасні наукові дані щодо зв'язку між ПТСР і ЦД 2 типу. Особливу увагу приділено аналізу біологічних механізмів, поведінкових факторів-медіаторів та демографічних відмінностей, які впливають на цей зв'язок. У межах огляду встановлено, що ПТСР пов'язаний із підвищеним ризиком розвитку ЦД 2 типу, а також з погіршенням контролю глікемії, зокрема зростанням рівня глікованого гемоглобіну (HbA1c). У той же час, у пацієнтів із ЦД 2 типу спостерігається значно вищий рівень поширеності ПТСР, особливо серед жінок, ВПО та ВБД¹⁷. Населення, яке зазнало впливу конфліктів, демонструвало підвищену вразливість, причому ВПО стикалися з подвійним тягарем метаболічних та психічних розладів^{18,19}.

Контекст травми та демографічні особливості відіграють важливу роль у модифікації ризику ЦД 2 типу. Особливо помітними є розбіжності за статтю. Одне з досліджень, проведене серед людей, які пережили катастрофи, виявило, що ПТСР є чинником ризику розвитку ЦД 2 типу виключно у чоловіків²⁰. Інші ж дослідження, які аналізували стан ВПО та цивільних осіб, що пережили травматичні події, виявили непропорційно високу поширеність ПТСР та гірший контроль рівня глюкози в крові саме у жінок^{21,22}. Ці спостереження узгоджуються з результатами метааналізу, який свідчить, що жінки з ПТСР можуть мати вищий ризик розвитку ЦД 2 типу через статеві специфічні гормональні взаємодії. Подібним чином повідомляється, що 30,4% афроамериканських жінок із низьким рівнем доходів, які страждали на ЦД 2 типу, відповідали критеріям для діагностики ПТСР, причому травматичні події мали значний негативний вплив на глікемічний контроль²³. Крім того, у жінок-військовослужбовців як пережита військова травма, так і вираженість ПТСР можуть збільшувати ризик гестаційного діабету²⁴. Однак, повідомляється, що психологічний дистрес, спричинений травматичними подіями, які призвели до розвитку ПТСР, асоціюється з маніфестацією ЦД у чоловіків, тоді як подібного зв'язку з жінками не виявлено²⁵. Серед літніх ветеранів війни у Шотландії зафіксовано підвищений ризик розвитку ЦД 2 типу, проте така асоціація не простежувалася серед молодших ВБД. Виявлено також позитивну кореляцію між ЦД 2 типу та ПТСР, особливо за умови наявності супутніх афективних розладів.

¹⁶ B. Bergman et al., 'Type 2 Diabetes in Scottish Military Veterans: A Retrospective Cohort Study', *BMJ Open*, vol. 12, no. 2, 2022, e057431.

¹⁷ N. Aleid et al., 'A Systematic Review of the Bidirectional Relationship Between Post-Traumatic Stress Disorder (PTSD) and the Development of Type 2 Diabetes', *Cureus*, vol. 29, no. 9, 2025, e93457.

¹⁸ N. Aleid et al., 'A Systematic Review of the Bidirectional Relationship Between Post-Traumatic Stress Disorder (PTSD) and the Development of Type 2 Diabetes', *Cureus*, vol. 29, no. 9, 2025, e93457.

¹⁹ V.A. Serhiyenko et al., 'Post-Traumatic Stress Disorder, Metabolic Syndrome, Diabetic Distress, and Vitamin B1 Benfotiamine', *International Neurological Journal*, vol. 21, no. 1, 2025, pp. 96-107.

²⁰ H. Hirai et al., 'Psychological Burden Predicts New-Onset Diabetes in Men: A Longitudinal Observational Study in the Fukushima Health Management Survey after the Great East Japan earthquake', *Frontiers in Endocrinology*, vol. 13, 2022, 1008109.

²¹ H.D. Dixon et al., 'Trauma Exposure and Stress-Related Disorders in African American Women with Diabetes Mellitus', *Endocrinology, Diabetes & Metabolism*, vol. 3, no. 2, 2020, e00111.

²² T. Venkatachalam et al., 'The Impact of Forced Displacement: Trauma, Increased Levels of Inflammation and Early Presentation of Diabetes in Women Syrian Refugees', *Journal of Public Health (Oxford, England)*, vol. 45, no. 3, 2023, e437-e446.

²³ H.D. Dixon et al., 'Trauma Exposure and Stress-Related Disorders in African American Women with Diabetes Mellitus', *Endocrinology, Diabetes & Metabolism*, vol. 3, no. 2, 2020, e00111.

²⁴ L. Manzo et al., 'The Impact of Military Trauma Exposures on Servicewomen's Pregnancy Outcomes: A Scoping Review', *Journal of Midwifery & Women's Health*, vol. 69, no. 5, 2024, pp. 634-646.

²⁵ H. Hirai et al., 'Psychological Burden Predicts New-Onset Diabetes in Men: A Longitudinal Observational Study in the Fukushima Health Management Survey after the Great East Japan earthquake', *Frontiers in Endocrinology*, vol. 13, 2022, 1008109.

Крім поведінкових факторів, значущу роль відіграють хронічний стрес і запальні процеси, які погіршують перебіг захворювання. Це підтверджується, зокрема, дослідженнями серед ВБД, де було встановлено, що запальні маркери, такі як С-реактивний білок (СРБ) і інтерлейкін (ІЛ)-6, впливають на зв'язок між ПТСР і розвиток ЦД 2 типу^{26,27}.

Симптоми ПТСР у дорослих із недостатньо контрольованим ЦД 2 типу, навіть за відсутності депресії, асоціюються з підвищеним рівнем діабетичного дистресу²⁸. В дослідженні серед жінок-біженців віком від 35 до 55 років ідентифіковано симптоматичний ПТСР та коморбідна тривожність або депресія поряд із підвищеним рівнем маркерів запалення й ЦД 2 типу. Ці результати наголошують на необхідності впровадження психосоціальних терапевтичних втручань для зменшення імунної дисфункції внаслідок стресу та запобігання подальшому розвитку діабету в цій вразливій групі²⁹. Повідомляється, що у ВБД, ризик розвитку ЦД підвищується у 59,02% випадків. Зокрема, тривале перебування в умовах хронічного стресу (поширеність ПТСР = 42,62%) у період служби в зоні конфлікту сприяв швидкому та раптовому розвитку діабету. Цей стан супроводжувався високими середніми показниками рівня глюкози в плазмі крові та HbA1c³⁰.

Y. Yu et al., з метою оцінки впливу ПТСР на генетичну схильність до ЦД 2 типу та опосередкованих факторів, використали метод менделівської рандомізації (Mendelian randomization, MR). Дані були отримані з баз FinnGen, Британського біобанку (UK Biobank) та Європейського інституту біоінформатики (European Bioinformatics Institute). Інформацію щодо ПТСР, ЦД 2 типу, ожиріння та артеріальної гіпертензії (АГ), серед 406822; 70127; 453592 та 462933 осіб відповідно, надав відділ інтегративної епідеміології (Integrative Epidemiology Unit, IEU) досліджень асоціацій на рівні геному (Genome-Wide Association Studies, GWAS). Дослідження показало, що ПТСР асоціюється з підвищеною генетичною схильністю до ЦД 2 типу, ожиріння та АГ. Однак жодного зв'язку з генетичною схильністю до дисліпідемії (ДЛП), вживанням алкоголю чи палінням виявлено не було. Аналіз опосередкованого впливу продемонстрував, що ПТСР сприяє зростанню генетичної схильності до ЦД 2 типу через збільшення генетичної схильності до ожиріння та АГ. Таким чином, отримані результати свідчать про те, що ПТСР підвищує ризик розвитку ЦД 2 типу, причому частина цього впливу обумовлена ожирінням та АГ. Отже, ефективна профілактика та лікування ПТСР можуть стати важливим кроком у зниженні ризику ЦД 2 типу³¹. Y. Song et al. провели дослідження двосторонніх взаємозв'язків між ПТСР та ЦД 2 типу за допомогою аналізу MR. Для цього автори використали дані GWAS про осіб європейського походження, що включали 23121 учасника з ПТСР і 80154 випадки ЦД 2 типу. За результатами аналізу виявлено, що ПТСР має причинно-наслідковий зв'язок із підвищеним ризиком розвитку ЦД 2 типу. Отримані дані підтверджують, що ПТСР може бути фактором ризику розвитку ЦД 2 типу³². Узагальнені результати вказують на тісний зв'язок між ПТСР та підвищеним ризиком розвитку ЦД 2 типу,

²⁶ Y. Song et al., 'Causal Associations Between Posttraumatic Stress Disorder and Type 2 Diabetes', *Diabetology & Metabolic Syndrome*, vol. 17, no. 1, 2025, 63.

²⁷ S. Friend et al., 'C-Reactive Protein: Marker of Risk for Posttraumatic Stress Disorder and Its Potential for a Mechanistic Role in Trauma Response and Recovery', *The European Journal of Neuroscience*, vol. 55, no. 9-10, 2022, pp. 2297-2310.

²⁸ D. Arigo et al., 'Unique Relations Between Posttraumatic Stress Disorder Symptoms and Patient Functioning in Type 2 Diabetes', *Journal of Health Psychology*, vol. 25, no. 5, 2020, pp. 652-664.

²⁹ T. Venkatachalam et al., 'The Impact of Forced Displacement: Trauma, Increased Levels of Inflammation and Early Presentation of Diabetes in Women Syrian Refugees', *Journal of Public Health (Oxford, England)*, vol. 45, no. 3, 2023, e437-e446.

³⁰ N.V. Popenko and O.O. Tanasiichuk, 'Risk Factors of Diabetes Mellitus in ATO/JFO Participants, Clinical Course, Diagnosis and Their Impact on Duration of Treatment', *Ukrainian Journal of Military Medicine*, vol. 3, no. 1, 2022, pp. 41-50.

³¹ Y. Yu et al., 'Effect of Post-Traumatic Stress Disorder on Type 2 Diabetes and the Mediated Effect of Obesity: A Mendelian Randomization Study', *Frontiers in Endocrinology*, vol. 15, 2024, 1375068.

³² Y. Song et al., 'Causal Associations Between Posttraumatic Stress Disorder and Type 2 Diabetes', *Diabetology & Metabolic Syndrome*, vol. 17, no. 1, 2025, 63.

причому знову ж таки продемонстровано, що ожиріння та АГ виступають ключовими факторами-посередниками³³. Крім того, результати перехресного дослідження, проведеного серед сирійських біженців у Йорданії, виявили, що 69,8 % біженців із АГ або ЦД 2 типу демонстрували виразну симптоматику ПТСР³⁴.

ПТСР може бути пов'язаний із виникненням діабету через фізіологічні та поведінкові зміни, що його супроводжують. Одним із ключових факторів є хронічний стрес, що розвивається внаслідок перенесеної травми. Це призводить до дисбалансу в регуляції гіпоталамо-гіпофізарно-адреналової вісі (ГГАВ). Порушення функціонування ГГАВ супроводжується спочатку підвищеним рівнем кортизолу, а згодом його стійким зниженням, що потенційно може викликати системне хронічне запалення низької інтенсивності (ХЗНІ), включно із розвитком нейрозапальних процесів^{35,36}. Нейрозапалення сприяє апоптозу нейронів і дисфункції передачі глутамату в центральній нервовій системі (ЦНС), особливо в зонах мозку, що відповідають за регуляцію апетиту. Ці процеси збільшують ризик ожиріння, розвиток ІР та ПТГ^{37,38}.

Хронічний стрес також може спричинити посилення периферичного імунного запалення. Це може призвести до порушення регуляції мікробіоти кишечника, що, у свою чергу, додатково впливає на метаболічний стан організму^{39,40}. Численні дослідження продемонстрували, що рівні маркерів запалення, таких як ІЛ-1, ІЛ-6, фактор некрозу пухлини-альфа (ФНП-α), інтерферон та СРБ, підвищені в периферичній крові та спинномозковій рідині пацієнтів з ПТСР⁴¹. ХЗНІ не тільки сприяє збільшенню ваги, але й викликає ІР. Ці стани ще більше підвищують рівні прозапальних цитокінів, створюючи таким чином замкнуте коло⁴².

Крім того, стрес, навіть якщо він є лише суб'єктивним, а не об'єктивно реальним, може безпосередньо ініціювати патофізіологічну нейроендокринну реакцію. Це включає неадекватну секрецію інсуліну, що призводить до більш значних коливань вмісту глюкози в крові та сприяє ІР⁴³. На поведінковому рівні, стійкі негативні посттравматичні емоції часто призводять до нездорових звичок, таких як переїдання, паління, зловживання алкоголем та малорухливий спосіб життя, а це загальновизнані фактори ризику ЦД 2 типу⁴⁴.

Ветерани війни стикаються з унікальним поєднанням факторів ризику: участь у бойових діях, хронічний стрес, травматичні переживання та супутні психологічні розлади. Це підвищує їхню

³³ Y. Yu et al., 'Effect of Post-Traumatic Stress Disorder on Type 2 Diabetes and the Mediated Effect of Obesity: A Mendelian Randomization Study', *Frontiers in Endocrinology*, vol. 15, 2024, 1375068.

³⁴ O. Gammoh et al., 'Psychological Resilience in Individuals with Type 2 Diabetes Mellitus in Jordan Is Associated with Insomnia Severity: A Cross-Sectional Analysis', *Journal of Clinical Medicine*, vol. 15, no. 2, 2026, 880.

³⁵ S.G. Nunez et al., 'Chronic Stress and Autoimmunity: The Role of HPA Axis and Cortisol Dysregulation', *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 26, no. 20, 2025, 9994.

³⁶ M. Ring, 'An Integrative Approach to HPA Axis Dysfunction: From Recognition to Recovery', *The American Journal of Medicine*, vol. 138, no. 10, 2025, pp. 1451-1463.

³⁷ A. Adamu, et al., 'The Role of Neuroinflammation in Neurodegenerative Diseases: Current Understanding and Future Therapeutic Targets', *Frontiers in Aging Neuroscience*, vol. 16, 2024, 1347987.

³⁸ M. García-Domínguez, 'Neuroinflammation: Mechanisms, Dual Roles, and Therapeutic Strategies in Neurological Disorders', *Current Issues in Molecular Biology*, vol. 47, no.6, 2025, 417.

³⁹ A. Warren, et al., 'Dangers of the Chronic Stress Response in the Context of the Microbiota-Gut-Immune-Brain Axis and Mental Health: A Narrative Review', *Frontiers in Immunology*, vol. 15, 2024, 1365871.

⁴⁰ M. Balcerowska and P. Kwaśnik, 'The Multifaceted Impact of Stress on Immune Function', *Molecular Biology Reports*, vol. 52, no. 1, 2025, 1008.

⁴¹ D.H. Lee, et al., 'Neuroinflammation in Post-Traumatic Stress Disorder', *Biomedicines*, vol. 10, no. 5, 2022, 953.

⁴² V.A. Serhiyenko et al., 'Type 2 Diabetes Mellitus, Cerebral Small Vessel Disease and Depressive Disorders', *International Neurological Journal*, vol. 21, no. 3, 2025, pp. 226-237.

⁴³ M. Yuan, et al., 'Epigenetic Regulation in Major Depression and Other stress-Related Disorders: Molecular Mechanisms, Clinical Relevance and Therapeutic Potential', *Signal Transduction and Targeted Therapy*, vol. 8, no. 1, 2023, 309.

⁴⁴ Y. Song et al., 'Causal Associations Between Posttraumatic Stress Disorder and Type 2 Diabetes', *Diabetology & Metabolic Syndrome*, vol. 17, no. 1, 2025, 63.

схильність як до гострих, так і до хронічних ССЗ⁴⁵. ПТСР є дуже поширеним серед ВБД, і дедалі більше даних свідчать про зв'язок цього розладу з несприятливими серцево-судинними наслідками⁴⁶. Зокрема виявлено залежність «доза-реакція» між тяжкістю симптомів ПТСР та ризиком ССЗ, що свідчить про те, що в основі цього зв'язку, окрім поведінкових факторів, можуть лежати біологічні механізми⁴⁷. Новітні генетичні та нейробиологічні дослідження дають додаткове розуміння цих механізмів. Особи з ПТСР демонструють підвищену адренергічну активність як у спокійному стані, так і у відповідь на стрес, що призводить до стійкого підвищення частоти серцевих скорочень та АТ, які створюють хронічне гемодинамічне навантаження на серцево-судинну систему⁴⁸. ПТСР також пов'язують із підвищеною поширеністю ДЛП та ПТГ, що свідчить про те, що пов'язані з травмою нейроендокринні зміни можуть прискорювати розвиток метаболічного ризику⁴⁹. Хоча біологічні механізми відіграють ключову роль у розумінні ризику ССЗ, пов'язаного з ПТСР, сам ПТСР є багатовимірним станом, що охоплює психологічні, поведінкові та фізіологічні процеси. Такі симптоми, як порушення сну, гіперактивність та хронічний стрес, можуть сприяти підвищенню серцево-судинної вразливості через поведінкові та вегетативні механізми⁵⁰.

Отже, патофізіологічні процеси, що об'єднують ПТСР із розвитком ЦД 2 типу, ймовірно, включають дисфункцію регуляції ГГAB, оксидативний стрес (ОС), ХЗНІ, ІР, симпато-адреналової системи, інших метаболічних порушень і змін стану вегетативної нервової системи (ВНС), а також значний психологічний тягар, має важливі наслідки з точки зору медичних проблем та прогнозу захворювань^{51,52}. Це може спричиняти надмірне виділення кортизолу, що підвищує ризик розвитку ІР. На це вказують дані досліджень, які демонструють підвищений рівень глюкози у крові натщесерце у пацієнтів із ПТСР. Додатково, прозапальні цитокіни, такі як ФНП- α та ІЛ-6, можуть негативно впливати на функціонування β -клітин⁵³. Ці біологічні фактори нерідко ускладнюються поведінковими аспектами, властивими особам із ПТСР, а саме низьку фізичну активність, незбалансоване харчування та порушення режиму прийому ліків, що разом створює несприятливі умови для метаболічного здоров'я⁵⁴.

ПОСТТРАВМАТИЧНИЙ СТРЕСОВИЙ РОЗЛАД ТА ВІТАМІН В12

Хронічна активація систем стресової реакції при ПТСР сприяє приєднанню і прогресуванню ОС, ендотеліальній дисфункції та судинному запаленню, які є основними механізмами розвитку

⁴⁵ K.J. Bourassa, et al., 'Trauma, Posttraumatic Stress Disorder, and Incident Chronic Disease', *Annals of Behavioral Medicine: A Publication of the Society of Behavioral Medicine*, vol. 59, no. 1, 2025, kaaf095.

⁴⁶ O.A.S. Al Nakhebi, et al., 'Post-Traumatic Stress Disorder (PTSD) and Cardiovascular Diseases: A Systematic Review and Meta-Analysis', *Journal of Clinical Medicine*, vol. 14, no. 22, 2025, 7979.

⁴⁷ E. Jansen van Vuren, et al., 'Cardiovascular Risk and Allostatic Load in PTSD: The Role of Cumulative Trauma and Resilience in Affected and Trauma-Exposed Adults', *Journal of Psychiatric Research*, vol. 182, 2025, pp. 338-346.

⁴⁸ X. Chen, et al., 'PTSD Increases Risk for Hypertension Development Through PVN Activation and Vascular Dysfunction in Sprague Dawley Rats', *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, vol. 13, no. 11, 2024, 1423.

⁴⁹ *Te same l.*

⁵⁰ A.R. Rábago-Monzón, et al., 'Stress-Induced Sleep Dysregulation: The Roles of Astrocytes and Microglia in Neurodegenerative and Psychiatric Disorders', *Biomedicine*, vol. 13, no. 5, 2025, 1121.

⁵¹ H.D. Dixon et al., 'Trauma Exposure and Stress-Related Disorders in African American Women with Diabetes Mellitus', *Endocrinology, Diabetes & Metabolism*, vol. 3, no. 2, 2020, e00111.

⁵² V. Serhiyenko, et al., 'Vitamin B12, Depression and Type 2 Diabetes (Literature Review)', *Problems of Endocrine Pathology*, vol. 82, no. 4, 2025, pp. 54-69.

⁵³ T. Venkatachalam et al., 'The Impact of Forced Displacement: Trauma, Increased Levels of Inflammation and Early Presentation of Diabetes in Women Syrian Refugees', *Journal of Public Health (Oxford, England)*, vol. 45, no. 3, 2023, e437-e446.

⁵⁴ M.M. Lica, et al., 'Assessment of Psychopathology in Adolescents with Insulin-Dependent Diabetes (IDD) and the Impact on Treatment Management', *Children (Basel, Switzerland)*, vol. 8, no. 5, 2021, 414.

ССЗ⁵⁵Ошибка! Источник ссылки не найден. Ці процеси можуть впливати на ІС метаболізм - шлях, що відіграє вирішальну роль у регуляції Нсу⁵⁶. Порушення ІС обміну, які характеризуються підвищеним рівнем Нсу та змінами у концентраціях фолатів і вітаміну В12, сприяють ХЗНІ та ендотеліальній дисфункції. Це, у свою чергу, може слугувати модифікованим механізмом, що пояснює зв'язок між ПТСР та ССЗ⁵⁷Ошибка! Источник ссылки не найден.⁵⁸. Нсу відіграє важливу роль у патогенезі низки захворювань, зокрема ПТСР^{59,60}. Підвищений рівень Нсу спостерігається у осіб, які зазнають хронічного психологічного стресу^{61,62}. Дефіцит фолатів та вітаміну В12 може сприяти як підвищеному рівню Нсу, так і збільшенню навантаження ХЗНІ^{63,64}. Хоча традиційні клінічні визначення класифікують гіпергомоцистеїнемію при рівнях ≥ 15 мкмоль/л, дані свідчать про те, що судинний ризик може зростати при нижчих концентраціях у верхній частині нормального діапазону^{65,66}.

Метою одного із досліджень було вивчення взаємозв'язків між Нсу, фолатами, вітаміном В12, діагнозом ПТСР, участю у лікуванні ПТСР та ризиком ССЗ у популяції ветеранів війни США. Проведено кількісний, порівняльний ретроспективний аналіз медичних карт 279 американських ВБД. Вибір змінних та їх інтерпретація здійснювалися за моделлю систем Ньюмана. Встановлено, що підвищений рівень Нсу був істотно пов'язаний з віком, статтю, расою, систолічним АТ, рівнем фолатів, вітаміну В12, діагнозом ПТСР та ризиком ССЗ. Отримані результати підтверджують, що Нсу є клінічно значущим біомаркером, який пов'язує ПТСР та ризик ССЗ⁶⁷.

Фолати та вітамін В12 беруть участь у процесах метилювання, що впливають на синтез нейромедіаторів⁶⁸. Це вказує на потенційну біологічну взаємодію між психологічними симптомами, пов'язаними з ПТСР та ССЗ⁶⁹. У сукупності ці асоціації підтверджують необхідність вивчення Нсу, фолатів та вітаміну В12 як фізіологічних змінних, що можуть пов'язувати діагноз ПТСР та участь у лікуванні з ризиком ССЗ у ВБД.

⁵⁵ D. Djuric, et al., 'High-Sensitivity Troponins and Homocysteine: Combined Biomarkers for Better Prediction of Cardiovascular Events', *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 26, no. 17, 2025, 8186.

⁵⁶ C. Coyle, 'Psychobiological Predictors of Cardiovascular Disease Risk in Veterans: Associations Among PTSD, Homocysteine, and B Vitamins', *Biological Research For Nursing*, vol. 0, no. 0, 2026, pp. 1–10.

⁵⁷ C. Coyle, 'Psychobiological Predictors of Cardiovascular Disease Risk in Veterans: Associations Among PTSD, Homocysteine, and B Vitamins', *Biological Research For Nursing*, vol. 0, no. 0, 2026, pp. 1–10.

⁵⁸ H. Jakubowski and Ł. Witucki, 'Homocysteine Metabolites, Endothelial Dysfunction, and Cardiovascular Disease', *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 26, no. 2, 2025, 746.

⁵⁹ A. McCaddon and J.W. Miller, 'Homocysteine-A Retrospective and Prospective Appraisal', *Frontiers in Nutrition*, vol. 10, 2023, 1179807.

⁶⁰ P. Prajjwal, et al., 'Association of Alzheimer's Dementia with Oral Bacteria, Vitamin B12, Folate, Homocysteine Levels, and Insulin Resistance Along With Its Pathophysiology, Genetics, Imaging, and Biomarkers', *Disease-a-Month : DM*, vol. 69, no. 5, 2023, 101546.

⁶¹ L.L. Hurjui, et al., 'Homocysteine Attack on Vascular Endothelium-Old and New Features', *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 26, no. 13, 2025, 6298.

⁶² W. Tian, et al., 'Role of Hyperhomocysteinemia in Atherosclerosis: From Bench to Bedside', *Annals of Medicine*, vol. 57, no. 1, 2025, 2457527.

⁶³ D. Yuan, et al., 'Mechanism of Homocysteine-mediated Endothelial Injury and Its Consequences for Atherosclerosis', *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, vol. 9, 2023, 1109445.

⁶⁴ D. Agostini, et al., 'Homocysteine, Nutrition, and Gut Microbiota: A Comprehensive Review of Current Evidence and Insights', *Nutrients*, vol. 17, no. 8, 2025, 1325.

⁶⁵ J. Sun, et al., 'Combined Effect of Hyperhomocysteinemia and Smoking on the Severity of Coronary Artery Disease in Young Adults ≤ 35 Years of Age: A Hospital-based Observational Study', *BMC Cardiovascular Disorders*, vol. 21, no. 1, 2021, 484.

⁶⁶ I.E. Emrich, et al., 'Association of Homocysteine, S-Adenosylhomocysteine and S-Adenosylmethionine with Cardiovascular Events in Chronic Kidney Disease', *Nutrients*, vol. 17, no. 4, 2025, 626.

⁶⁷ C. Coyle, 'Psychobiological Predictors of Cardiovascular Disease Risk in Veterans: Associations Among PTSD, Homocysteine, and B Vitamins', *Biological Research For Nursing*, vol. 0, no. 0, 2026, pp. 1–10.

⁶⁸ Yi. Wang, et al., 'The Complex Link of the Folate-Homocysteine Axis to Myocardial Hypertrophy and Heart Failure: From Mechanistic Exploration to Clinical Vision', *Journal of Advanced Research*, 2025, S2090-1232(25)00730-1.

⁶⁹ M. Faugere, et al., 'Vitamin D, B9, and B12 Deficiencies as Key Drivers of Clinical Severity and Metabolic Comorbidities in Major Psychiatric Disorders', *Nutrients*, vol. 17, no. 7, 2025, 1167.

Відомо, що мітохондрії є осередками енергозабезпечення клітин, а також беруть участь у таких процесах, як диференціація клітин, передача клітинної інформації та апоптоз, і мають здатність регулювати ріст клітин і клітинні цикли. Водночас ці органели надзвичайно чутливі до уражень. Зокрема, дисфункція мітохондрій часто спостерігається в гіпокампі пацієнтів із психічними розладами^{70,71}. Гіпокамп відповідає за навчання, пам'ять, пізнання та емоції, а також є однією з ключових ділянок мозку, що опосередковує реакцію на стрес⁷². Страх, порушення пам'яті та емоційні розлади є характерними проявами ПТСР; при цьому патофізіологічні процеси в гіпокампі відіграють важливу роль⁷³.

Метилування ДНК – це епігенетичний механізм, за допомогою якого до молекули ДНК приєднуються метильні групи, що змінює транскрипційну активність ділянки ДНК без зміни послідовності нуклеотидів. Зазвичай, при метилуванні нуклеотидів в промоторній зоні відбувається пригнічення транскрипції ДНК. Найпоширенішим типом метилування є додавання метильної групи до 5'-положення цитозинових нуклеотидів, особливо в ділянках острівців 5'-цитозин-фосфат-гуаніну-3' (5'-cytosine-phosphate-guanine-3', CpG island)-динуклеотидів. Цей процес каталізується ДНК-метилтрансферазами (DNA methyltransferase, DNMT)⁷⁴. Метилування мітохондріальної ДНК (мтДНК) є важливим регулятором експресії генів і функції мітохондрій⁷⁵. У контексті ПТСР дослідження, проведене Y. Li et al., виявило значні зміни у метилуванні мтДНК в гіпокампі. Зокрема, спостерігалось помітне зростання активності мітохондріальних DNMTs та збільшення рівня метилування мтДНК у гіпокампі щурів при моделюванні ПТСР за допомогою протоколу одноразового тривалого стресу (Single Prolonged Stress, SPS). Це підвищення корелювало зі зниженням експресії білків дихального ланцюга, що призводило до розвитку мітохондріальної дисфункції⁷⁶. Порушення енергетичного обміну та дисбаланс окисно-відновних процесів у гіпокампі, у свою чергу, можуть бути причиною структурних і функціональних змін, властивих ПТСР. До них належать зменшення об'єму гіпокампу та труднощі в емоційній регуляції⁷⁷.

Порушення регуляції метилування мтДНК пов'язане зі спадом когнітивних здібностей та нейродегенеративними розладами (НДР). Модифікація ДНК шляхом метилування 5-метилцитозину (5-methylcytosine, 5MC) є одним з найпоширеніших видів. Докази свідчать, що чинники пошкодження можуть збільшувати ступінь метилування геному і регулювати експресію ДНК-метилтрансферази 1 (DNA methyltransferase 1, DNMT1) і ДНК-метилтрансферази 3A (DNA methyltransferase 3 alpha, DNMT3A) в нейронах гіпокампу⁷⁸.

⁷⁰ G.B. Kaplan, N.A. Dadhi and C.S. Whitaker, 'Mitochondrial Dysfunction in Animal Models of PTSD: Relationships Between Behavioral Models, Neural Regions, and Cellular Maladaptation', *Frontiers in Physiology*, vol. 14, 2023, 1105839.

⁷¹ N.H. Ali, et al., 'Role of Brain Renin-angiotensin System in Depression: A New Perspective', *CNS Neuroscience & Therapeutics*, vol. 30, no. 4, 2024, e14525.

⁷² E.A. Albadawi, 'Structural and Functional Changes in the Hippocampus Induced by Environmental Exposures', *Neurosciences (Riyadh, Saudi Arabia)*, vol. 30, no. 1, 2025, pp. 5-19.

⁷³ K.J. Ressler, et al., 'Post-Traumatic Stress Disorder: Clinical and Translational Neuroscience from cells to circuits', *Nature Reviews. Neurology*, vol. 18, no. 5, 2022, pp. 273-288.

⁷⁴ S. Kitazawa, 'Why Does DNA Methylation Accumulate at CpG Loci?: Sequential Analysis of Cdkn2a/p16Ink4a Gene Methylation in a Rat Renal Tumor Model', *Acta Histochemica et Cytochemica*, vol. 59, no. 1, 2026, pp. 23-34.

⁷⁵ E.N.W. Wheeler, et al., 'DNA Methylation and Brain Structure and Function Across the Life Course: A Systematic Review', *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 113, 2020, pp. 133-156.

⁷⁶ Y. Li Y, et al., 'Compound B Vitamins Mitigate Posttraumatic Stress Disorder-Like Behaviors Induced by Single Prolonged Stress in Rats by Inhibiting Hippocampal Mitochondrial DNA Methylation', *Journal of Neurorestoration*, vol. 13, no. 2, 2025, 100187.

⁷⁷ R. Fujikawa, et al., 'Neurogenesis-Dependent Remodeling of Hippocampal Circuits Reduces PTSD-Like Behaviors in Adult Mice', *Molecular Psychiatry*, vol. 29, no. 11, 2024, pp. 3316-3329.

⁷⁸ H. Geng, et al., 'Cadmium-Induced Global DNA Hypermethylation Promoting Mitochondrial Dynamics Dysregulation in Hippocampal Neurons', *Environmental Toxicology*, vol. 39, no. 4, 2024, pp. 2043-2051.

Вітаміни групи В, зокрема В12, В6 і фолати (природна форма вітаміну В9), відіграють важливу роль у функціонуванні мозку та когнітивному здоров'ї⁷⁹. Вітаміни В12, В6 і В9 залучені до процесів метилювання мтДНК, що відбуваються в мозку; беруть участь у процесах метилювання, синтезі нейромедіаторів та підтримання цілісності нейронів^{80,81}. Нещодавні дослідження засвідчили, що споживання вітамінів групи В тісно пов'язане з когнітивними функціями у деяких пацієнтів із депресією та тривожними розладами^{82,83}. Крім того, показано, що вітаміни групи В продемонстрували вищу ефективність у лікуванні когнітивної дисфункції, зумовленої судинними захворюваннями ЦНС, порівняно з традиційними методами медичного втручання⁸⁴. Водночас лише обмежена кількість досліджень розглядає зв'язок між вітамінами В12, В6, В9 і ПТСР^{85,86}. Крім цього, відзначено здатність вітамінів В12, В6 і В9 ефективно регулювати рівень Нсу у плазмі крові. Однак питання щодо можливого позитивного впливу вітамінів В12, В6 і В9 на когнітивну дисфункцію, спричинену стресом, перебіг ПТСР залишається відкритим та потребує подальшого дослідження.

ЦУКРОВИЙ ДІАБЕТ 2 ТИПУ І ВІТАМІН В12

Гіперглікемія, ймовірно, уповільнює засвоєння вітаміну В12 і, як наслідок, сприяє підвищенню його рівня в сироватці крові у пацієнтів із ЦД 2 типу. Крім того, більш високий рівень глюкози в крові може негативно впливати на метаболізм вітаміну В12, оскільки незадовільний контроль показників глікемії призводить до накопичення кінцевих продуктів глікування. Це, у свою чергу, може викликати неферментативне глікування рецептора вітаміну В12, що перевантажує його і знижує функціональність. Активація процесів неферментативного глікування сприяє втраті здатності розпізнавання рецептором вітаміна В12 під час його поглинання клітинами. Такі порушення утруднюють надходження вітаміну В12 у клітину та його подальше засвоєння, що веде до підвищення рівня цього вітаміну в сироватці крові у пацієнтів із ЦД 2 типу⁸⁷.

У кількох дослідженнях було встановлено зв'язок між дефіцитом вітаміну В12 та ЦД 2 типу, зокрема серед пацієнтів, які протягом тривалого часу застосовували метформін. Відомо, що метформін може зменшувати абсорбцію вітаміну В12 у кишківнику, причому дефіцит ціанокобаламіну діагностується майже у 30 % хворих на ЦД 2 типу, які отримують тривале лікування цим лікарським засобом⁸⁸. Зниження рівня кобаламіну потенційно спричиняє зростання концентрації Нсу, розвитку діабетичної нейропатії та посилення ОС - усі ці фактори сприяють

⁷⁹ T. Li, et al., 'Vitamin B6, B12, and Folate's Influence on Neural Networks in the UK Biobank Cohort', *Nutrients*, vol. 16, no. 13, 2024, 2050.

⁸⁰ A. Serhiyenko, et al., 'Type 2 Diabetes Mellitus, Neurocognitive Disorders, and Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids (Literature Review)', *Problems of Endocrine Pathology*, vol. 83, no. 1, 2026, pp. 52-61.

⁸¹ A. Ahmed, et al., 'The Role of Vitamins in Dementia Prevention and Cognitive Health: A Comprehensive Review', *Journal of Alzheimer's Disease : JAD*, vol. 108, no. 2, 2025, pp. 443-460.

⁸² H.W. Baik, 'Mental Health and Micronutrients: A Narrative Review', *Annals of Clinical Nutrition and Metabolism*, vol. 16, no. 3, 2024, pp. 112-119.

⁸³ I.H. Rosenberg, 'Vitamin B12 and Age-Related Cognitive Decline-Dementia and Alzheimer's Disease', *Food and Nutrition Bulletin*, vol. 45, no. 1_suppl, 2024, S50-S52.

⁸⁴ Y. Ling, et al., 'Associations of Folate/Folic Acid Supplementation Alone and in Combination With Other B Vitamins on Dementia Risk and Brain Structure: Evidence From 466 224 UK Biobank Participants', *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, vol. 79, no. 4, 2024, glad266.

⁸⁵ Y. Li Y, et al., 'Compound B Vitamins Mitigate Posttraumatic Stress Disorder-Like Behaviors Induced by Single Prolonged Stress in Rats by Inhibiting Hippocampal Mitochondrial DNA Methylation', *Journal of Neurorestoratology*, vol. 13, no. 2, 2025, 100187.

⁸⁶ T. Li, et al., 'Vitamin B6, B12, and Folate's Influence on Neural Networks in the UK Biobank Cohort', *Nutrients*, vol. 16, no. 13, 2024, 2050.

⁸⁷ W. Li, et al., 'Serum Vitamin B12 Levels and Glycemic Fluctuation in Patients With Type 2 Diabetes Mellitus', *Therapeutic Advances in Endocrinology and Metabolism*, vol. 13, 2022, 20420188221102800.

⁸⁸ M. Infante, et al., 'Long-Term Metformin Therapy and Vitamin B12 Deficiency: An Association to Bear in Mind', *World Journal of Diabetes*, vol. 12, no. 7, 2021, pp. 916-931.

загостренню ІР та погіршенню глікемічного контролю⁸⁹. Результати ряду досліджень підтверджують існування кореляції між низьким рівнем вітаміну В12 та незадовільними показниками глікемії. Наприклад, було виявлено, що пацієнти з ЦД 2 типу на тлі дефіциту ціанокобаламіну демонстрували вищі рівні HbA1c⁹⁰. Крім того, деякі автори зазначають про те, що призначення добавок із вітаміном В12 підвищує чутливість до інсуліну у пацієнтів із ЦД 2 типу⁹¹. Однак існуючі дані залишаються неоднозначними і потребують подальших досліджень, особливо серед специфічних популяційних груп. Це особливо актуально для регіонів, у яких поширені вегетаріанські дієтичні звички та обмежене споживання продуктів тваринного походження, що підвищує ризик розвитку дефіциту ціанокобаламіну.

ВИСНОВКИ

1. ПТСР являє собою серйозний психічний стан, що розвивається внаслідок прямого чи непрямого переживання подій, які пов'язані з реальною або потенційною загрозою життю, серйозними травмами або сексуальним насильством.

2. Біологічні механізми, що пов'язують ПТСР із ЦД 2 типу включають порушення регуляції ГГAB, ХЗНІ, ІР, симпато-адреналової системи, змін стану ВНС, інших метаболічних порушень, а також значний психологічний тягар. Тривалий вплив стресу при ПТСР призводить до гіперкортицизму, що сприяє ІР та накопиченню вісцерального жиру – ключових чинників патогенезу ЦД 2 типу. Крім того, підвищений рівень прозапальних цитокінів (зокрема, ІЛ-6, СРБ), що спостерігається у пацієнтів з ПТСР, сприяє дисфункції β-клітин та порушенню метаболізму глюкози.

3. Незважаючи на ці висновки, залишаються суттєві прогалини у розумінні того, як стать, статус ВПО та коморбідні захворювання модулюють взаємодію ПТСР та ЦД 2 типу, особливо у ВПО та ветеранів війни.

4. Вітамін В12 відіграє важливу роль у метаболізмі Нсу, функціонуванні ЦНС та підтриманні фізіологічного перебігу когнітивних процесів. Дефіцит ціанокобаламіну пов'язаний із підвищеним ризиком нейропсихіатричних та кардіометаболічних захворювань.

5. Результати РКД свідчать, що додаткове застосування препаратів вітаміну В12 у дозі 1000 мкг на добу може позитивно впливати на психічний стан, когнітивні функції та деякі показники метаболічного здоров'я.

6. Комплексна корекція дефіциту вітаміну В12, може бути перспективною допоміжною терапією у лікуванні пацієнтів із ПТСР та коморбідним ЦД 2 типу.

7. Для остаточного підтвердження ефективності таких підходів необхідні подальші великі РКД з довготривалим періодом спостереження.

⁸⁹ J.R. Ulloque-Badaracco, et al., 'Vitamin B12, Folate, and Homocysteine in Metabolic Syndrome: A Systematic Review and Meta-Analysis', *Frontiers in Endocrinology*, vol. 14, 2023, 1221259.

⁹⁰ F.M. Tayong, et al., 'Prevalence of Vitamin B12 Deficiency in Type 2 Diabetic Patients on Long-Term Metformin Therapy', *Cureus*, vol. 17, no. 7, 2025, e88265.

⁹¹ S. Satapathy, et al., 'Folic Acid and Vitamin B12 Supplementation in Subjects with Type 2 Diabetes Mellitus: A Multi-Arm Randomized Controlled Clinical Trial', *Complementary Therapies in Medicine*, vol. 53, 2020, 102526.

WAR EXPOSOME, ЕНДОКРИННІ ДИЗРУПТОРИ ТА ВАЖКІ МЕТАЛИ У СТРУКТУРІ СУЧАСНОЇ ЕКОТОКСИКОЛОГІЇ ВІЙНИ

THE WAR EXPOSOME, ENDOCRINE DISRUPTORS, AND HEAVY METALS IN THE FRAMEWORK OF MODERN WAR ECOTOXICOLOGY

Сергієнко Вікторія Олександрівна, доктор медичних наук, професор кафедри ендокринології, проректор з наукової роботи, ДНТ “Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького”, serhiyenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6414-0956>

Чемерис Орест Мирославович, доктор медичних наук, професор кафедри хірургії №1, ректор, ДНТ “Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького”, serhiyenko@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-8550-6980>

Іванченко Наталія Олександрівна, генеральний директор ДУ "Львівський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України", <https://orcid.org/0000-0002-0112-6962>

Сергієнко Олександр Олексійович, доктор медичних наук, професор кафедри ендокринології, ДНТ “Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького”, serhiyenkoa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7519-2279>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.18>

Анотація. Сучасні воєнні конфлікти формують принципово новий тип глобального медико-екологічного навантаження, наслідки якого виходять далеко за межі безпосередніх бойових втрат і гострих травматичних ушкоджень. У розділі узагальнено сучасні наукові уявлення про концепцію war exposome як інтегральну модель кумулятивної експозиції, що поєднує вплив токсичних хімічних агентів, продуктів горіння, дрібнодисперсних частинок, важких металів, ендокринних дизрупторів, психоемоційного стресу та інших чинників довкілля, характерних для територій активних бойових дій. Розглянуто місце концепції експозому в сучасній екологічній медицині та її значення для розуміння довгострокових наслідків війни для громадського здоров'я. Проаналізовано основні джерела токсичного навантаження в умовах війни, зокрема руйнування промислової інфраструктури, пожежі, детонацію боєприпасів, контамінацію атмосферного повітря, водних систем і ґрунтів. Особливу увагу приділено ендокринним дизрупторам та важким металам як ключовим компонентам war exposome, здатним порушувати гормональну регуляцію, індукувати оксидативний стрес, мітохондріальну дисфункцію, системне запалення та епігенетичні зміни. Узагальнено сучасні дані щодо молекулярних механізмів токсичної дії свинцю, кадмію, ртуті та інших металів, а також ролі дрібнодисперсних частинок PM2.5 і продуктів горіння у формуванні нейроендокринних, кардіометаболічних та нейроімунних порушень. Окремо висвітлено значення епігенетичного програмування та концепції Developmental Origins of Health and Disease (DOHaD) у контексті потенційних міжпоколінних наслідків воєнно-асоційованої токсичної експозиції. Розглянуто особливості впливу war exposome на найбільш вразливі групи населення, включаючи вагітних жінок, дітей та військовослужбовців. Обґрунтовано необхідність впровадження сучасних систем біомоніторингу, експозоміки та прецизійних підходів до оцінки кумулятивного екологічного навантаження як важливих інструментів забезпечення екологічної безпеки та збереження громадського здоров'я в умовах війни та післявоєнного відновлення.

Ключові слова: war exposome, ендокринні дизруптори, важкі метали, PM2.5, продукти горіння, оксидативний стрес, нейроендокринна дисрегуляція, епігенетика, токсикологія війни, експосоміка, громадське здоров'я, біомоніторинг.

Abstract. Modern armed conflicts create a fundamentally new form of global environmental health burden whose consequences extend far beyond direct combat injuries and acute traumatic events. This chapter summarizes contemporary scientific perspectives on the concept of the war exposome as an integrated model of cumulative exposure encompassing toxic chemicals, combustion products, fine particulate matter, heavy metals, endocrine-disrupting chemicals, psychosocial stressors, and other environmental factors characteristic of active conflict zones. The role of the exposome framework in modern environmental medicine and its importance for understanding the long-term health consequences of war are discussed. The major sources of toxic exposure associated with armed conflicts are analyzed, including the destruction of industrial infrastructure, large-scale fires, ammunition detonation, and contamination of air, water, and soil ecosystems. Particular attention is devoted to endocrine-disrupting chemicals and heavy metals as key components of the war exposome capable of impairing hormonal regulation, inducing oxidative stress, mitochondrial dysfunction, chronic inflammation, and epigenetic alterations. Current evidence regarding the molecular mechanisms of toxicity of lead, cadmium, mercury, and other metals is reviewed, together with the role of PM2.5 and combustion-derived pollutants in the development of neuroendocrine, cardiometabolic, and neuroimmune disturbances. Special emphasis is placed on epigenetic programming and the Developmental Origins of Health and Disease (DOHaD) concept as potential mechanisms underlying the transgenerational consequences of war-related toxic exposure. The chapter also addresses the vulnerability of specific population groups, including pregnant women, children, and military personnel. Finally, the importance of biomonitoring, exposomics, and precision environmental health approaches is highlighted as a scientific basis for assessing cumulative environmental burden and developing effective public health strategies aimed at mitigating the long-term consequences of war and supporting post-conflict recovery.

Keywords: war exposome, endocrine-disrupting chemicals, heavy metals, PM2.5, combustion products, oxidative stress, neuroendocrine dysregulation, epigenetics, war toxicology, exposomics, public health, biomonitoring.

1. WAR EXPOSOME ЯК НОВА МЕДИКО-ЕКОЛОГІЧНА ПАРАДИГМА

1.1. Трансформація екологічної медицини в умовах сучасних воєнних конфліктів

Сучасні збройні конфлікти формують принципово нову модель глобального медико-екологічного навантаження, у межах якої наслідки війни виходять далеко за межі гострої бойової травми та безпосередніх втрат серед населення. Якщо у XX столітті військова медицина концентрувалася переважно на лікуванні механічних ушкоджень, інфекційних ускладнень і гострих психічних травм, то у XXI столітті дедалі більшого значення набувають довготривалі екотоксикологічні та нейроендокринні наслідки війни, пов'язані з масштабним руйнуванням

довкілля та інфраструктури, тривалою контамінацією екосистем і формуванням хронічного мультитоксичного навантаження на населення^{1,2,3,4,5}.

Сучасна війна є не лише гуманітарною чи військово-політичною кризою, але й складним екологічним феноменом, здатним визначати структуру громадського здоров'я протягом десятиліть після завершення активної фази бойових дій. Руйнування металургійних комбінатів, нафтобаз, хімічних підприємств, електростанцій, транспортної інфраструктури та систем водоочищення супроводжується вивільненням значної кількості токсичних речовин у навколишнє середовище. Унаслідок цього формується масштабне техногенне навантаження на атмосферне повітря, водні системи та ґрунтовий покрив, що характеризується високою тривалістю екологічної персистенції та складною багатокомпонентною токсичною дією^{6,7,8,9}.

Особливого значення набувають концепції «здоров'я навколишнього середовища», які розглядають здоров'я людини у нерозривному взаємозв'язку зі станом екосистеми. Сучасна екологічна медицина дедалі більше відходить від ізольованого аналізу окремих токсикантів і переходить до інтегральних моделей кумулятивного навантаження та змішаної токсикології, що дозволяють оцінювати комбінований вплив численних хімічних, фізичних, біологічних та психосоціальних стресорів^{10,11,12,13}.

Однією з ключових міждисциплінарних концепцій сучасної екологічної медицини стала модель експозому (exposome), запропонована Christopher Wild у 2005 році¹⁴. Відповідно до сучасних уявлень, експозом охоплює сукупність усіх зовнішніх впливів, які діють на організм людини протягом життя, включаючи хімічні токсиканти, фізичні фактори, нутритивні особливості, психоемоційні стресори, урбанізаційні впливи та соціальні детермінанти здоров'я^{15,16,17,18}. На відміну від класичної токсикології, яка традиційно аналізує вплив окремих агентів, концепція експозому розглядає людину як частину динамічної системи взаємодії з навколишнім середовищем.

¹ C.P. Wild, 'Complementing the Genome with an "Exposome": The Outstanding Challenge of Environmental Exposure Measurement in Molecular Epidemiology', *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, vol. 14, no. 8, 2005, pp. 1847-1850.

² G.W. Miller and D.P. Jones, 'The Nature of Nurture: Refining the Definition of the Exposome', *Toxicological Sciences*, vol. 137, no. 1, 2014, pp. 1-2.

³ S.M. Rappaport, 'Implications of the Exposome for Exposure Science', *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, vol. 21, no. 1, 2011, pp. 5-9.

⁴ M. Vrijheid, 'The Exposome: A New Paradigm to Study the Impact of Environment on Health', *Thorax*, vol. 69, no. 9, 2014, pp. 876-878.

⁵ A.C. Gore et al., 'EDC-2: The Endocrine Society's Second Scientific Statement on Endocrine-Disrupting Chemicals', *Endocrine Reviews*, vol. 36, no. 6, 2015, pp. E1-E150.

⁶ L.N. Vandenberg et al., 'Hormones and Endocrine-Disrupting Chemicals: Low-Dose Effects and Nonmonotonic Dose Responses', *Endocrine Reviews*, vol. 33, no. 3, 2012, pp. 378-455.

⁷ E. Diamanti-Kandarakis et al., 'Endocrine-Disrupting Chemicals: An Endocrine Society Scientific Statement', *Endocrine Reviews*, vol. 30, no. 4, 2009, pp. 293-342.

⁸ J.J. Heindel et al., 'Metabolism Disrupting Chemicals and Metabolic Disorders', *Reproductive Toxicology*, vol. 68, 2017, pp. 3-33.

⁹ D.J.P. Barker, 'The Developmental Origins of Adult Disease', *Journal of the American College of Nutrition*, vol. 23, no. 6, 2004, pp. 588S-595S.

¹⁰ P.D. Gluckman and M.A. Hanson, 'Developmental Origins of Disease Paradigm: A Mechanistic and Evolutionary Perspective', *Pediatric Research*, vol. 56, no. 3, 2004, pp. 311-317.

¹¹ R.D. Brook et al., 'Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease', *Circulation*, vol. 121, no. 21, 2010, pp. 2331-2378.

¹² C.A. Pope and D.W. Dockery, 'Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines That Connect', *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 56, no. 6, 2006, pp. 709-742.

¹³ D.E. Schraufnagel, 'The Health Effects of Ultrafine Particles', *Experimental & Molecular Medicine*, vol. 52, no. 3, 2020, pp. 311-317.

¹⁴ P.J. Landrigan et al., 'The Lancet Commission on Pollution and Health', *The Lancet*, vol. 391, no. 10119, 2018, pp. 462-512.

¹⁵ WHO, *Environmental Health in Emergencies and Disasters: A Practical Guide*, Geneva, World Health Organization, 2021.

¹⁶ UNEP, *Environmental Consequences of the War in Ukraine: Preliminary Assessment*, Nairobi, United Nations Environment Programme, 2022.

¹⁷ M.L. Block and L. Calderón-Garcidueñas, 'Air Pollution: Mechanisms of Neuroinflammation and CNS Disease', *Trends in Neurosciences*, vol. 32, no. 9, 2009, pp. 506-516.

¹⁸ L.G. Costa et al., 'Neurotoxicity of Traffic-Related Air Pollution', *NeuroToxicology*, vol. 59, 2017, pp. 133-139.

Подальший розвиток цієї концепції в умовах сучасних збройних конфліктів привів до формування поняття war exposome - специфічного різновиду експозому, характерного для територій активних бойових дій. War exposome являє собою комплексну систему взаємопов'язаних токсичних і стресових впливів, які виникають унаслідок вибухових процесів, масштабних пожеж, руйнування промислових об'єктів, деградації санітарної інфраструктури, вимушеної міграції населення та хронічного психоемоційного стресу та їхній сумарний довгостроковий вплив на здоров'я людини^{19,20,21,22}.

На відміну від локальних техногенних катастроф, war exposome характеризується винятковою тривалістю, багатокомпонентністю та невизначеністю експозиції. Населення одночасно піддається впливу великої кількості токсичних агентів у поєднанні з нутритивним дефіцитом, інфекційними ризиками, порушенням доступу до медичної допомоги та хронічним стресом. Саме тому сучасні війни розглядаються не лише як військово-політичні події, а як масштабні екотоксикологічні процеси, здатні формувати довготривалі нейроендокринні, метаболічні, імунологічні та епігенетичні наслідки^{23,24,25,26}.

1.2. Хімічне навантаження у структурі war exposome

Одним із центральних компонентів war exposome є хімічне забруднення навколишнього середовища. Вибухи боєприпасів, руйнування промислових об'єктів, горіння паливно-мастильних матеріалів, детонація вибухових речовин і масштабні пожежі супроводжуються утворенням складних токсичних аерозолів та вивільненням значної кількості небезпечних хімічних сполук^{27,28,29,30}.

У навколишнє середовище потрапляють важкі метали, поліциклічні ароматичні вуглеводні, діоксини, фурани, легкі органічні сполуки, продукти неповного горіння, мікропластик, а також дрібнодисперсні частинки PM_{2.5} і PM₁₀ – ключові екологічні показники, які визначають рівень забруднення повітря дрібнодисперсними частинками. Особливу небезпеку становлять ультрадисперсні частинки, які завдяки малому аеродинамічному діаметру здатні проникати у

¹⁹ P. Grandjean and P.J. Landrigan, 'Neurobehavioural Effects of Developmental Toxicity', *The Lancet Neurology*, vol. 13, no. 3, 2014, pp. 330-338.

²⁰ ATSDR, *Toxicological Profile for Lead*, Atlanta, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2020.

²¹ ATSDR, *Toxicological Profile for Cadmium*, Atlanta, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012.

²² ATSDR, *Toxicological Profile for Mercury*, Atlanta, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2022.

²³ G. Flora, D. Gupta and A. Tiwari, 'Toxicity of Lead: A Review with Recent Updates', *Interdisciplinary Toxicology*, vol. 5, no. 2, 2012, pp. 47-58.

²⁴ G. Genchi et al., 'The Effects of Cadmium Toxicity', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 11, 2020, 3782.

²⁵ G. Bjørklund et al., 'The Toxicology of Mercury: Current Research and Emerging Trends', *Environmental Research*, vol. 159, 2017, pp. 545-554.

²⁶ P.B. Tchounwou et al., 'Heavy Metal Toxicity and the Environment', *EXS*, vol. 101, 2012, pp. 133-164.

²⁷ M. Valko, H. Morri, and M.T.D. Cronin, 'Metals, Toxicity and Oxidative Stress', *Current Medicinal Chemistry*, vol. 12, no. 10, 2005, pp. 1161-1208.

²⁸ J. Liu, R.A. Goyer and M.P. Waalkes, 'Toxic Effects of Metals', in *Casarett and Doull's Toxicology*, 9th ed., New York, McGraw-Hill, 2019.

²⁹ C. Gundacker, and M. Hengstschläger, 'The Role of the Placenta in Fetal Exposure to Heavy Metals', *Wiener Medizinische Wochenschrift*, vol. 162, no. 9-10, 2012, pp. 201-206.

³⁰ L. Hou et al., 'Environmental Chemical Exposures and Human Epigenetics', *International Journal of Epidemiology*, vol. 41, no. 1, 2012, pp. 79-105.

дистальні відділи легень, потрапляти у системний кровотік і долати гематоенцефалічний бар'єр^{31,32,33,34}.

Суттєвою особливістю забруднення внаслідок військових дій є мультиметалевий та мультикомпонентний характер токсичного навантаження. У реальних умовах населення піддається не ізольованому впливу окремих токсикантів, а комплексній дії сумішей, токсичність яких може значно перевищувати ефекти індивідуальних компонентів. Саме тому сучасна токсикологія дедалі більше орієнтується на концепції вивчення кумулятивного ризику, які враховує адитивні, потенціюючі та синергічні ефекти комбінованої експозиції^{35,36,37}.

Важливе місце у структурі war exposome займають ендокринні дизруптори (ЕД) – екзогенні речовини або суміші, здатні порушувати функціонування ендокринної системи та індукувати несприятливі біологічні ефекти на рівні організму, потомства або популяції^{38, 39,40}. Принциповою особливістю ЕД є здатність діяти у надзвичайно низьких концентраціях, демонструвати нелінійні дозо-ефектні залежності та формувати довготривалі епігенетичні зміни.

На відміну від класичних цитотоксичних агентів, дія EDCs реалізується переважно через порушення тонких механізмів гормональної сигналізації. Встановлено, що багато ендокринних дизрупторів здатні взаємодіяти з естрогеновими, андрогеновими та тиреоїдними рецепторами, модифікувати активність ферментів стероїдогенезу, впливати на експресію генів та змінювати міжклітинний сигналінг^{41,42,43,44}.

1.3. Важкі метали як ключовий компонент war exposome

Серед численних токсикантів особливе значення мають важкі метали, які належать до найбільш персистентних і біоаккумулятивних забруднювачів сучасного довкілля. На відміну від більшості органічних сполук, метали практично не піддаються біологічній деградації, здатні тривалий час циркулювати у біосфері та накопичуватися у ґрунтах, водних системах, рослинах, тваринах і тканинах людини^{45, 46, 47,48}.

³¹ F. Perera and J. Herbstman, 'Prenatal Environmental Exposures, Epigenetics, and Disease', *Reproductive Toxicology*, vol. 31, no. 3, 2011, pp. 363-373.

³² R. Barouki et al., 'Developmental Origins of Non-Communicable Disease: Implications for Research and Public Health', *Environmental Health*, vol. 11, 2012, 42.

³³ J.J. Heindel et al., 'Developmental Origins of Health and Disease: Integrating Environmental Influences', *Endocrinology*, vol. 156, no. 10, 2015, pp. 3416-3421.

³⁴ D.C. Bellinger, 'Very Low Lead Exposures and Children's Neurodevelopment', *Current Opinion in Pediatrics*, vol. 20, no. 2, 2008, pp. 172-177.

³⁵ B.P. Lanphear et al., 'Low-Level Environmental Lead Exposure and Children's Intellectual Function', *Environmental Health Perspectives*, vol. 113, no. 7, 2005, pp. 894-899.

³⁶ L. Trasand, et al., 'Burden of Disease and Costs of Exposure to Endocrine Disrupting Chemicals in the European Union', *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, vol. 100, no. 4, 2015, pp. 1245-1255.

³⁷ A. Bergman et al., *State of the Science of Endocrine Disrupting Chemicals*, Geneva, WHO/UNEP, 2013.

³⁸ H. Selye, 'Stress and the General Adaptation Syndrome', *British Medical Journal*, vol. 1, no. 4667, 1950, pp. 1383-1392.

³⁹ B.S. McEwen, 'Protective and Damaging Effects of Stress Mediators', *New England Journal of Medicine*, vol. 338, no. 3, 1998, pp. 171-179.

⁴⁰ B.S. McEwen and P. Tucker, 'Critical Biological Pathways for Chronic Psychosocial Stress and Research Opportunities to Advance the Consideration of Stress in Chemical Risk Assessment', *American Journal of Public Health*, vol. 101, suppl. 1, 2011, pp. S131-S139.

⁴¹ G.M. Slavich, 'Psychoneuroimmunology of Stress and Mental Health', *Oxford Research Encyclopedia of Psychology*, 2020.

⁴² L. Calderón-Garcidueñas et al., 'Brain Inflammation and Alzheimer's-Like Pathology in Individuals Exposed to Severe Air Pollution', *Toxicologic Pathology*, vol. 32, no. 6, 2004, pp. 650-658.

⁴³ P.J. Landrigan and R.A. Etzel, *Textbook of Children's Environmental Health*, Oxford University Press, 2014.

⁴⁴ P. Grandjean, *Only One Chance: How Environmental Pollution Impairs Brain Development and How to Protect the Brains of Next Generation*, Oxford University Press, 2013.

⁴⁵ WHO, *Air Pollution and Child Health: Prescribing Clean Air*, Geneva, World Health Organization, 2018.

⁴⁶ World Bank, *The Toll of War: The Economic and Social Consequences of the Conflict in Ukraine*, Washington DC, 2023.

⁴⁷ UNEP, *Addressing Environmental Consequences of Armed Conflicts*, Nairobi, 2020.

⁴⁸ L. S. Birnbau, and S.E. Fenton, 'Cancer and Developmental Exposure to Endocrine Disruptors', *Environmental Health Perspectives*, vol. 111, no. 4, 2003, pp. 389-394.

У сучасній екотоксикології важкі метали розглядаються не лише як класичні цитотоксичні агенти, але і як активні ендокринні дизруптори та мультитаргетні токсиканти, здатні одночасно впливати на нервову систему, ендокринні осі, імунну регуляцію, енергетичний метаболізм та функціонування мітохондрій^{49, 50, 51, 52}. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах війни, коли руйнування промислової інфраструктури та застосування боєприпасів супроводжуються масовим вивільненням металовмісних аерозолів.

У навколишнє середовище потрапляють свинець, кадмій, ртуть, нікель, хром, сурма, мідь, барій та інші метали, що входять до складу боєприпасів, бронетехніки, вибухових сумішей, акумуляторів і промислового обладнання^{53,54,55}. Після осідання вони включаються у харчові ланцюги, накопичуються у ґрунтах та водних системах і формують тривале токсичне навантаження навіть після завершення активної фази бойових дій.

Особливу небезпеку становить хронічний вплив малих доз – тривалий вплив низьких концентрацій токсикантів. На відміну від гострих інтоксикацій, така експозиція часто не супроводжується вираженою клінічною симптоматикою на ранніх етапах, однак здатна роками підтримувати системне запалення, оксидативний стрес (ОС), нейроендокринну дизрегуляцію та епігенетичні порушення^{56,57,58,59}.

1.4. Оксидативний стрес і нейроендокринна дизрегуляція

Незалежно від природи токсиканта, одним із центральних патогенетичних механізмів war exposome є ОС. Комбінований вплив важких металів, PM2.5, продуктів горіння, поліциклічних ароматичних вуглеводнів і хронічного психоемоційного стресу супроводжується надмірною генерацією реактивних форм кисню (ROS), виснаженням антиоксидантних систем та порушенням мітохондріального метаболізму⁶⁰.

Хронічний ОС ушкоджує клітинні мембрани, білки, мітохондрії та ДНК, створюючи передумови для розвитку нейродегенерації, ендотеліальної дисфункції, метаболічного синдрому (МС), серцево-судинної патології та канцерогенезу^{61, 62}. Важливе значення має також активація NF-

⁴⁹ R.T. Zoeller, et al., 'Endocrine-Disrupting Chemicals and Public Health Protection: A Statement of Principles from The Endocrine Society', *Endocrinology*, vol. 153, no. 9, 2012, pp. 4097-4110.

⁵⁰ J.J. Heindel, R. Newbold, and T.T. Schug, 'Endocrine Disruptors and Obesity', *Nature Reviews Endocrinology*, vol. 11, no. 11, 2015, pp. 653-661.

⁵¹ K.P. Phillips and W.G. Foster, 'Key Developments in Endocrine Disrupter Research and Human Health', *Journal of Toxicology and Environmental Health B*, vol. 11, no. 5-6, 2008, pp. 322-344.

⁵² D.B. Miller and J.P. O'Callaghan, 'Do Early-Life Insults Contribute to the Late-Life Development of Parkinson and Alzheimer Diseases?', *Metabolism*, vol. 57, suppl. 2, 2008, pp. S44-S49.

⁵³ L. Calderón-Garcidueñas and R. Torres-Jardón, 'Air Pollution, Socioeconomic Status, and Children's Cognition in Megacities', *Frontiers in Psychology*, vol. 3, 2012, p. 217.

⁵⁴ M. Guxens and J. Sunyer, 'A Review of Epidemiological Studies on Neuropsychological Effects of Air Pollution', *Swiss Medical Weekly*, vol. 141, 2012, p. w13322.

⁵⁵ M. Jaishankar et al., 'Toxicity, Mechanism and Health Effects of Some Heavy Metals', *Interdisciplinary Toxicology*, vol. 7, no. 2, 2014, pp. 60-72.

⁵⁶ K. Vrijens, V. Bollati and T.S. Nawrot, 'MicroRNAs as Potential Signatures of Environmental Exposure or Effect: A Systematic Review', *Environmental Health Perspectives*, vol. 123, no. 5, 2015, pp. 399-411.

⁵⁷ M.C. Senut et al., 'Lead Exposure Disrupts Global DNA Methylation in Human Embryonic Stem Cells and Alters Their Neuronal Differentiation', *Toxicological Sciences*, vol. 139, no. 1, 2014, pp. 142-161.

⁵⁸ WHO, *Chemical Safety and Health*, Geneva, World Health Organization, 2020.

⁵⁹ UNEP, *Frontiers 2022: Noise, Blazes and Mismatches*, Nairobi, United Nations Environment Programme, 2022.

⁶⁰ P.J. Landrigan and R. Fuller, 'Pollution, Health and Development: The Need for a New Paradigm', *Reviews on Environmental Health*, vol. 30, no. 4, 2015, pp. 251-255.

⁶¹ M.C. Senut et al., 'Lead Exposure Disrupts Global DNA Methylation in Human Embryonic Stem Cells and Alters Their Neuronal Differentiation', *Toxicological Sciences*, vol. 139, no. 1, 2014, pp. 142-161.

⁶² P.J. Landrigan and R. Fuller, 'Pollution, Health and Development: The Need for a New Paradigm', *Reviews on Environmental Health*, vol. 30, no. 4, 2015, pp. 251-255.

кВ-залежних сигнальних шляхів, що супроводжується розвитком системного запалення та порушенням нейроімунної регуляції.

Окрему роль у структурі war exposome відіграє хронічний психоемоційний стрес. Тривала активація гіпоталамо-гіпофізарно-наднирникової (ГГН)-осі супроводжується гіперсекрецією кортизолу, порушенням циркадних ритмів, розвитком аллостатичного перевантаження та змінами автономної нервової регуляції. Сучасні дослідження демонструють, що психологічний стрес здатний потенціювати токсичність ксенобіотиків, посилюючи ОС, змінюючи проникність гематоенцефалічного бар'єра та порушуючи функціонування антиоксидантних систем^{63,64}.

Таким чином, war exposome є складною інтегральною моделлю кумулятивного навантаження, у межах якої одночасно реалізуються механізми токсикологічного, нейроендокринного, імунологічного та психосоціального навантаження. Сучасна війна формує принципово новий тип екологічного навантаження, здатний визначати структуру громадського здоров'я протягом багатьох десятиліть.

2. КОНЦЕПЦІЯ ЕНДОКРИННИХ ДИЗРУПТОРІВ У СУЧАСНІЙ ТОКСИКОЛОГІЇ

2.1. Формування концепції ендокринних дизрупторів

Концепція ендокринних дизрупторів є однією з ключових парадигм сучасної екологічної медицини, молекулярної ендокринології та екологічної токсикології. Упродовж останніх десятиліть накопичено значний обсяг експериментальних, клінічних та епідеміологічних даних, які свідчать про здатність численних антропогенних хімічних речовин порушувати функціонування ендокринної системи навіть у надзвичайно низьких концентраціях^{65, 66, 67}.

Ендокринна система є складною інтегрованою мережею регуляції, що забезпечує координацію росту, розвитку, репродуктивної функції, енергетичного метаболізму, поведінкових реакцій та адаптації до стресу. Порушення гормональної сигналізації супроводжується системними патологічними ефектами, які можуть реалізовуватися як на рівні окремих органів і систем, так і на популяційному рівні^{68,69,70,71}.

Перші переконливі докази ендокринних дизрупторів були отримані після застосування діетилстильбестролу у вагітних жінок у середині ХХ століття. Надалі було продемонстровано, що внутрішньоутробний вплив цієї сполуки асоціюється з аномаліями розвитку репродуктивної системи, підвищеним ризиком аденокарциноми, безпліддям та порушенням статевого розвитку у потомства^{72,73}. Саме ці спостереження стали одним із фундаментальних підґрунть для формування сучасної концепції ендокринної дизрупції.

⁶³ M. Jaishankar et al., 'Toxicity, Mechanism and Health Effects of Some Heavy Metals', *Interdisciplinary Toxicology*, vol. 7, no. 2, 2014, pp. 60-72.

⁶⁴ M.C. Senut et al., 'Lead Exposure Disrupts Global DNA Methylation in Human Embryonic Stem Cells and Alters Their Neuronal Differentiation', *Toxicological Sciences*, vol. 139, no. 1, 2014, pp. 142-161.

⁶⁵ A.C. Gore et al., 'EDC-2: The Endocrine Society's Second Scientific Statement on Endocrine-Disrupting Chemicals', *Endocrine Reviews*, vol. 36, no. 6, 2015, pp. E1-E150.

⁶⁶ L.N. Vandenberg et al., 'Hormones and Endocrine-Disrupting Chemicals: Low-Dose Effects and Nonmonotonic Dose Responses', *Endocrine Reviews*, vol. 33, no. 3, 2012, pp. 378-455.

⁶⁷ E. Diamanti-Kandarakis et al., 'Endocrine-Disrupting Chemicals: An Endocrine Society Scientific Statement', *Endocrine Reviews*, vol. 30, no. 4, 2009, pp. 293-342.

⁶⁸ Ibid 65.

⁶⁹ Ibid 66.

⁷⁰ Ibid 67.

⁷¹ J.J. Heindel et al., 'Metabolism Disrupting Chemicals and Metabolic Disorders', *Reproductive Toxicology*, vol. 68, 2017, pp. 3-33.

⁷² Ibid 65.

⁷³ Ibid 66.

Дальший розвиток токсикології продемонстрував, що гормонально активні токсиканти можуть впливати не лише на репродуктивну систему, але й на нейроендокринну регуляцію, метаболічний гомеостаз, імунну відповідь та процеси клітинної диференціації. У 1991 році було офіційно запропоновано термін ЕД, що фактично започаткувало новий напрям сучасної токсикології та науки про екологічне здоров'я⁷⁴.

2.2. Основні класи ендокринних дизрупторів

До основних груп ЕД належать поліхлоровані біфеніли, діоксини, фурани, фталати, бісфенол А, PFAS, органохлорні пестициди, бромовані антипірени, поліциклічні ароматичні вуглеводні та важкі метали^{75,76}. Значна частина цих сполук належить до стійких органічних забруднювачів, які характеризуються високою ліпофільністю, тривалим періодом напіввиведення, біоаккумуляцією та здатністю до глобальної атмосферної міграції.

Особливу небезпеку становить те, що сучасна людина практично ніколи не контактує лише з одним токсикантом. У навколишньому середовищі одночасно присутні десятки або сотні хімічних агентів, здатних взаємодіяти між собою та формувати складні адитивні, потенційні або синергічні ефекти^{77, 78, 79}. У зв'язку з цим сучасна токсикологія поступово відходить від концепції «одна речовина – один ефект» і дедалі більше орієнтується на вивчення кумулятивного навантаження.

В умовах війни ця проблема набуває особливої актуальності. Горіння пластмас, руйнування полімерних матеріалів, детонація боєприпасів і пожежі промислових об'єктів супроводжуються масовим утворенням хімічних ЕД, які потрапляють у повітря, воду та харчові ланцюги^{80,81,82}.

2.3. Молекулярні механізми дії ЕД

Механізми дії ендокринних дизрупторів є надзвичайно складними та багаторівневими. На відміну від класичних токсикантів, їх дія реалізується переважно не через пряме цитотоксичне ушкодження, а через порушення гормональної сигналізації, клітинного метаболізму та регуляції експресії генів^{83,84,85}.

Встановлено, що багато ЕД здатні взаємодіяти з естрогеновими, андрогеновими, тиреоїдними та глюкокортикоїдними рецепторами, а також з рецепторами PPAR γ і арил-гідрокарбонними рецепторами (AhR). Частина токсикантів імітує дію ендогенних гормонів, інші – блокують рецепторне зв'язування або змінюють функціонування сигнальних каскадів⁸⁶.

⁷⁴ A.C. Gore et al., 'EDC-2: The Endocrine Society's Second Scientific Statement on Endocrine-Disrupting Chemicals', *Endocrine Reviews*, vol. 36, no. 6, 2015, pp. E1-E150

⁷⁵ Ibid 74.

⁷⁶ L.N. Vandenberg et al., 'Hormones and Endocrine-Disrupting Chemicals: Low-Dose Effects and Nonmonotonic Dose Responses', *Endocrine Reviews*, vol. 33, no. 3, 2012, pp. 378-455.

⁷⁷ Ibid 74.

⁷⁸ Ibid 75.

⁷⁹ E. Diamanti-Kandarakis et al., 'Endocrine-Disrupting Chemicals: An Endocrine Society Scientific Statement', *Endocrine Reviews*, vol. 30, no. 4, 2009, pp. 293-342.

⁸⁰ R.T. Zoeller, et al., 'Endocrine-Disrupting Chemicals and Public Health Protection: A Statement of Principles from The Endocrine Society', *Endocrinology*, vol. 153, no. 9, 2012, pp. 4097-4110.

⁸¹ J.J. Heindel, R. Newbold, and T.T. Schug, 'Endocrine Disruptors and Obesity', *Nature Reviews Endocrinology*, vol. 11, no. 11, 2015, pp. 653-661.

⁸² K.P. Phillips and W.G. Foster, 'Key Developments in Endocrine Disrupter Research and Human Health', *Journal of Toxicology and Environmental Health B*, vol. 11, no. 5-6, 2008, pp. 322-344.

⁸³ L. S. Birnbau, and S.E. Fenton, 'Cancer and Developmental Exposure to Endocrine Disruptors', *Environmental Health Perspectives*, vol. 111, no. 4, 2003, pp. 389-394.

⁸⁴ Ibid 80.

⁸⁵ Ibid 81.

⁸⁶ Ibid 82.

Особливе значення має AhR-опосередкована токсичність діоксинів та поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Активація AhR-рецептора супроводжується індукцією ферментів CYP450, генерацією ROS, розвитком ОС та системного запалення^{87,88}.

Крім рецепторно-опосередкованих механізмів, ЕД здатні впливати на стероїдогенез, тиреоїдний гомеостаз, транспорт гормонів та функціонування ферментних систем. Значна частина цих ефектів реалізується через мітохондріальну дисфункцію, порушення кальцієвого сигналіngu та зміни енергетичного метаболізму клітини.

2.4. Низькодозова токсичність та non-monotonic dose-response relationship

Однією з ключових особливостей ендокринних дизрупторів є їхня здатність спричиняти виражені біологічні ефекти у надзвичайно низьких концентраціях. На відміну від класичної токсикології, де домінує концепція лінійної дозозалежності, для ЕД характерною є нелінійна крива – немонотонна залежність доза-відповідь, за якої низькі концентрації можуть мати суттєві біологічні наслідки^{89,90}.

Саме ця особливість значно ускладнює оцінку токсикологічного ризику, оскільки традиційні підходи до визначення безпечних доз не завжди адекватно відображають реальні біологічні ефекти низьких доз. У сучасній літературі активно дискутуються методологічні обмеження оцінки ЕД, включаючи труднощі екстраполяції експериментальних даних на популяційний рівень, вплив експозиції суміші та варіабельність індивідуальної чутливості^{91,92,93}.

Особливо вразливими до впливу хімічних речовин, що порушують роботу ендокринної системи є критичні періоди розвитку, включаючи ембріогенез, внутрішньоутробний розвиток, раннє дитинство та пубертатний період. Саме у ці часові вікна гормональна регуляція відіграє визначальну роль у формуванні органів і систем, тому навіть мінімальні порушення ендокринного гомеостазу можуть мати довготривалі наслідки^{94,95}.

2.5. Епігенетичні механізми та концепція DOHaD

Сучасні дослідження демонструють, що значна частина віддалених ефектів ЕД реалізується через епігенетичні механізми. Встановлено, що багато токсикантів здатні індукувати зміни метилювання ДНК, модифікації гістонів та дерегуляції мікроРНК, що супроводжується довготривалими змінами експресії генів^{96,97}.

Такі епігенетичні порушення можуть мати трансгенераційний характер і розглядаються як один із центральних механізмів фетального програмування у межах онкогенетичної концепції

⁸⁷ Ibid 83.

⁸⁸ Ibid 80.

⁸⁹ LN. Vandenberg et al., 'Hormones and Endocrine-Disrupting Chemicals: Low-Dose Effects and Nonmonotonic Dose Responses', *Endocrine Reviews*, vol. 33, no. 3, 2012, pp. 378-455.

⁹⁰ E. Diamanti-Kandarakis et al., 'Endocrine-Disrupting Chemicals: An Endocrine Society Scientific Statement', *Endocrine Reviews*, vol. 30, no. 4, 2009, pp. 293-342.

⁹¹ L. S. Birnbau, and S.E. Fenton, 'Cancer and Developmental Exposure to Endocrine Disruptors', *Environmental Health Perspectives*, vol. 111, no. 4, 2003, pp. 389-394.

⁹² R.T. Zoeller, et al., 'Endocrine-Disrupting Chemicals and Public Health Protection: A Statement of Principles from The Endocrine Society', *Endocrinology*, vol. 153, no. 9, 2012, pp. 4097-4110.

⁹³ J.J. Heindel, R. Newbold, and T.T. Schug, 'Endocrine Disruptors and Obesity', *Nature Reviews Endocrinology*, vol. 11, no. 11, 2015, pp. 653-661.

⁹⁴ J.J. Heindel et al., 'Metabolism Disrupting Chemicals and Metabolic Disorders', *Reproductive Toxicology*, vol. 68, 2017, pp. 3-33.

⁹⁵ C. Gundacke, and M. Hengstschläger, 'The Role of the Placenta in Fetal Exposure to Heavy Metals', *Wiener Medizinische Wochenschrift*, vol. 162, no. 9-10, 2012, pp. 201-206.

⁹⁶ K. Vrijens, V. Bollati and T.S. Nawrot, 'MicroRNAs as Potential Signatures of Environmental Exposure or Effect: A Systematic Review', *Environmental Health Perspectives*, vol. 123, no. 5, 2015, pp. 399-411.

⁹⁷ M.C. Senut et al., 'Lead Exposure Disrupts Global DNA Methylation in Human Embryonic Stem Cells and Alters Their Neuronal Differentiation', *Toxicological Sciences*, vol. 139, no. 1, 2014, pp. 142-161.

ініціації здоров'я та хвороб. Відповідно до сучасних уявлень, патологічне програмування організму може формуватися ще у внутрішньоутробному періоді під впливом токсичних, нутритивних або психоемоційних факторів^{98,99}.

Найвні дані свідчать про те, що внутрішньоутробна експозиція до ЕД асоціюється з підвищеним ризиком МС, ожиріння, інсулінорезистентності (ІР), репродуктивних порушень, нейрокогнітивної патології та ендокринних захворювань у подальшому житті^{100,101,102}. Особливе занепокоєння викликає можливість міжпоколінної передачі епігенетичних змін, що потенційно здатне формувати довготривалі популяційні наслідки токсичної експозиції, пов'язаної з війною.

Таким чином, концепція ЕД є одним із фундаментальних напрямів сучасної екологічної медицини та токсикології. В умовах сучасних воєнних конфліктів значення ЕД суттєво зростає, оскільки війна створює умови для масштабного та тривалого поширення гормонально активних токсикантів у навколишньому середовищі. Це формує принципово новий тип медико-екологічного навантаження, який поєднує токсикологічні, епігенетичні, нейроендокринні та популяційні механізми впливу.

3. ВАЖКІ МЕТАЛИ ЯК ЕНДОКРИННО-АКТИВНІ ТОКСИКАНТИ

3.1. Важкі метали у структурі сучасного екологічного навантаження

Важкі метали належать до найбільш небезпечних, персистентних і біоаккумулятивних забруднювачів сучасного довкілля. На відміну від більшості органічних токсикантів, вони практично не піддаються біологічній деградації, характеризуються тривалою циркуляцією у біосфері та здатністю накопичуватися у ґрунтах, водних екосистемах, рослинах, тваринах і тканинах людини¹⁰³. Упродовж останніх десятиліть накопичено значний обсяг токсикологічних, клінічних та епідеміологічних доказів того, що багато металів здатні функціонувати не лише як класичні цитотоксичні агенти, але й як активні ендокринні дизруптори.

Сучасна екотоксикологія розглядає важкі метали як один із ключових компонентів глобального екологічного навантаження, здатний формувати довготривалі нейроендокринні, метаболічні, репродуктивні та епігенетичні порушення^{104,105,106}. Їхня токсичність не обмежується гострими інтоксикаціями або локальним ушкодженням тканин. Найбільшу небезпеку становить саме хронічна низькодозова експозиція, здатна роками підтримувати системне запалення, ОС, нейроімунну дисрегуляцію та мітохондріальну дисфункцію.

Особливої актуальності проблема металотоксичності набуває в умовах сучасних воєнних конфліктів. Руйнування промислових підприємств, металургійних комбінатів, транспортної інфраструктури, електростанцій та складів боєприпасів супроводжується масовим вивільненням

⁹⁸ Ibid 94.

⁹⁹ Ibid 95.

¹⁰⁰ J.J. Heindel et al., 'Metabolism Disrupting Chemicals and Metabolic Disorders', *Reproductive Toxicology*, vol. 68, 2017, pp. 3-33.

¹⁰¹ C. Gundacker, and M. Hengstschläger, 'The Role of the Placenta in Fetal Exposure to Heavy Metals', *Wiener Medizinische Wochenschrift*, vol. 162, no. 9-10, 2012, pp. 201-206.

¹⁰² WHO, *Chemical Safety and Health*, Geneva, World Health Organization, 2020.

¹⁰³ P.J. Landrigan and R. Fuller, 'Pollution, Health and Development: The Need for a New Paradigm', *Reviews on Environmental Health*, vol. 30, no. 4, 2015, pp. 251-255.

¹⁰⁴ Ibid 100.

¹⁰⁵ Ibid 101.

¹⁰⁶ Ibid 102.

металовмісних аерозолів у навколишнє середовище^{107,108,109}. Унаслідок цього формується специфічний тип забруднення важкими металами забруднення, який характеризується високою персистентністю, комбінованою токсичною дією та тривалим включенням токсикантів у харчові ланцюги.

У контексті war exposome важкі метали є не лише локальними забруднювачами, але й компонентами транскордонного токсичного навантаження. Дрібнодисперсні частинки, що утворюються внаслідок вибухів, горіння техніки та руйнування промислових конструкцій, здатні переноситися на значні відстані, формуючи масштабне регіональне забруднення атмосферного повітря^{110,111,112}. Особливо небезпечними є PM_{2.5}-асоційовані метали та ультрадисперсні частинки, які легко проникають у дистальні відділи легень, потрапляють у системний кровотік і здатні долати гематоенцефалічний бар'єр.

3.2. Біологічна роль металів та межа між фізіологією і токсичністю

Метали та мікроелементи є фундаментальними компонентами біологічних систем і відіграють критично важливу роль у підтриманні структурної та функціональної цілісності організму. Есенціальні мікроелементи забезпечують функціонування ферментних систем, транспорт кисню, синтез гормонів, підтримання редокс-гомеостазу, імунну регуляцію, нейротрансмісію та енергетичний метаболізм^{113,114,115}.

Значна частина ферментів людини є металозалежними. Метали входять до складу цитохромів, оксидаз, супероксиддисмутази, пероксидаз, дейодиназ тиреоїдних гормонів та численних транскрипційних факторів. Водночас межа між фізіологічною необхідністю та токсичністю для багатьох мікроелементів є надзвичайно вузькою. За умов надлишкової експозиції навіть есенціальні елементи можуть набувати властивостей токсикантів та ендокринних дизрупторів^{116,117,118}.

У клінічній токсикології найбільше значення мають свинець, кадмій, ртуть, арсен, нікель та хром. Частина металів, зокрема мідь, марганець, цинк і залізо, є фізіологічно необхідними, однак за умов надлишкового накопичення здатні індукувати ОС і нейротоксичні ефекти^{119,120}. Натомість свинець, кадмій та ртуть не мають жодної відомої біологічної функції в організмі людини і розглядаються виключно як токсичні агенти.

¹⁰⁷ L. Calderón-Garcidueñas and R. Torres-Jardón, 'Air Pollution, Socioeconomic Status, and Children's Cognition in Megacities', *Frontiers in Psychology*, vol. 3, 2012, p. 217.

¹⁰⁸ M. Guxens and J. Sunyer, 'A Review of Epidemiological Studies on Neuropsychological Effects of Air Pollution', *Swiss Medical Weekly*, vol. 141, 2012, p. w13322.

¹⁰⁹ M. Jaishankar et al., 'Toxicity, Mechanism and Health Effects of Some Heavy Metals', *Interdisciplinary Toxicology*, vol. 7, no. 2, 2014, pp. 60-72.

¹¹⁰ L. Calderón-Garcidueñas and R. Torres-Jardón, 'Air Pollution, Socioeconomic Status, and Children's Cognition in Megacities', *Frontiers in Psychology*, vol. 3, 2012, p. 217.

¹¹¹ M. Guxens and J. Sunyer, 'A Review of Epidemiological Studies on Neuropsychological Effects of Air Pollution', *Swiss Medical Weekly*, vol. 141, 2012, p. w13322.

¹¹² M. Jaishankar et al., 'Toxicity, Mechanism and Health Effects of Some Heavy Metals', *Interdisciplinary Toxicology*, vol. 7, no. 2, 2014, pp. 60-72.

¹¹³ A.C. Gore et al., 'EDC-2: The Endocrine Society's Second Scientific Statement on Endocrine-Disrupting Chemicals', *Endocrine Reviews*, vol. 36, no. 6, 2015, pp. E1-E150.

¹¹⁴ L.N. Vandenberg et al., 'Hormones and Endocrine-Disrupting Chemicals: Low-Dose Effects and Nonmonotonic Dose Responses', *Endocrine Reviews*, vol. 33, no. 3, 2012, pp. 378-455.

¹¹⁵ WHO, *Chemical Safety and Health*, Geneva, World Health Organization, 2020.

¹¹⁶ Ibid 113.

¹¹⁷ Ibid 114.

¹¹⁸ E. Diamanti-Kandarakis et al., 'Endocrine-Disrupting Chemicals: An Endocrine Society Scientific Statement', *Endocrine Reviews*, vol. 30, no. 4, 2009, pp. 293-342.

¹¹⁹ M. Valko, H. Morri, and M.T.D. Cronin, 'Metals, Toxicity and Oxidative Stress', *Current Medicinal Chemistry*, vol. 12, no. 10, 2005, pp. 1161-1208.

¹²⁰ J. Liu, R.A. Goyer and M.P. Waalkes, 'Toxic Effects of Metals', in *Casarett and Doull's Toxicology*, 9th ed., New York, McGraw-Hill, 2019.

3.3. Молекулярні механізми токсичності важких металів

На відміну від багатьох класичних хімічних ЕД, більшість металів не мають прямої структурної подібності до стероїдних гормонів. Їхня ендокринна активність реалізується через складні багаторівневі механізми, які включають рецепторну мімікрію, взаємодію із сульфгідрильними групами білків, інгібування ферментних систем, порушення кальцієвого сигналіngu, генерацію ROS та епігенетичні зміни^{121,122,123}.

Одним із центральних механізмів металотоксичності є ОС. Значна частина металів здатна індукувати надмірну генерацію вільних радикалів, порушувати функціонування антиоксидантних систем та виснажувати клітинні резерви глутатіону^{124,125,126}. Унаслідок цього відбувається ушкодження клітинних мембран, білків, мітохондрій та ДНК, що створює підґрунтя для розвитку системного запалення та прогресування хронічної патології.

Особливе значення має мітохондріальна токсичність металів. Встановлено, що свинець, кадмій, ртуть та арсен здатні порушувати електронно-транспортний ланцюг, знижувати синтез АТР та індукувати різке підвищення проникності внутрішньої мітохондріальної мембрани^{0,0,0}. Це супроводжується активацією апоптозу, енергетичним дефіцитом клітини та прогресуванням тканинної дисфункції.

Особливо чутливими до мітохондріального ушкодження є нейрони, кардіоміоцити та β -клітини підшлункової залози, що частково пояснює зв'язок металотоксичності з нейродегенеративними захворюваннями, серцево-судинною патологією та порушеннями вуглеводного обміну^{127,128,129,130}.

3.4. Свинець як нейроендокринний токсикант

Свинець є одним із найбільш поширених та небезпечних токсичних речовин довкілля. Попри значне обмеження використання свинцю у промисловості, він і надалі залишається важливим компонентом техногенного забруднення, особливо в умовах військових конфліктів^{131,132}.

Основними джерелами свинцевої експозиції під час війни є вибухові процеси, детонація боєприпасів, горіння техніки, руйнування промислових конструкцій та контамінація ґрунтів. Після потрапляння в організм свинець здатний накопичуватися у кістковій тканині, де може депонуватися протягом десятиліть^{133, 134}.

Нейротоксичність свинцю пов'язана з його здатністю порушувати кальцієвий сигналінг, змінювати вивільнення нейромедіаторів та індукувати нейрозапалення. Особливо вразливими є діти

¹²¹ A.C. Gore et al., 'EDC-2: The Endocrine Society's Second Scientific Statement on Endocrine-Disrupting Chemicals', *Endocrine Reviews*, vol. 36, no. 6, 2015, pp. E1-E150.

¹²² L.N. Vandenberg et al., 'Hormones and Endocrine-Disrupting Chemicals: Low-Dose Effects and Nonmonotonic Dose Responses', *Endocrine Reviews*, vol. 33, no. 3, 2012, pp. 378-455.

¹²³ M. Jaishankar et al., 'Toxicity, Mechanism and Health Effects of Some Heavy Metals', *Interdisciplinary Toxicology*, vol. 7, no. 2, 2014, pp. 60-72.

¹²⁴ Ibid 121.

¹²⁵ Ibid 122.

¹²⁶ E. Diamanti-Kandarakis et al., 'Endocrine-Disrupting Chemicals: An Endocrine Society Scientific Statement', *Endocrine Reviews*, vol. 30, no. 4, 2009, pp. 293-342.

¹²⁷ Ibid 121.

¹²⁸ Ibid 122.

¹²⁹ Ibid 126.

¹³⁰ J.J. Heindel et al., 'Metabolism Disrupting Chemicals and Metabolic Disorders', *Reproductive Toxicology*, vol. 68, 2017, pp. 3-33.

¹³¹ P.B. Tchounwou et al., 'Heavy Metal Toxicity and the Environment', *EXS*, vol. 101, 2012, pp. 133-164.

¹³² M. Valko, H. Morri, and M.T.D. Cronin, 'Metals, Toxicity and Oxidative Stress', *Current Medicinal Chemistry*, vol. 12, no. 10, 2005, pp. 1161-1208.

¹³³ Ibid 131.

¹³⁴ Ibid 132.

та плід, оскільки навіть низькі концентрації свинцю асоціюються зі зниженням когнітивних функцій, порушеннями поведінки та нейропсихічного розвитку^{135, 136}.

Крім нейротоксичних ефектів, свинець здатний порушувати функціонування гіпоталамо-гіпофізарно-гонадної осі, впливати на сперматогенез, тиреоїдний гомеостаз та метаболізм вітаміну D^{137, 138}. Хронічна свинцева експозиція також асоціюється з артеріальною гіпертензією, ендотеліальною дисфункцією та підвищеним ризиком серцево-судинної патології.

3.5. Кадмій та ендокринна дизрегуляція

Кадмій є одним із найбільш токсичних і персистентних металів сучасного довкілля. Його період напіввиведення з організму може перевищувати 20-30 років, що зумовлює виражений кумулятивний характер токсичності^{139,140,141}.

У сучасній токсикології кадмій розглядається як металоестроген – метал, здатний взаємодіяти з естрогеновими рецепторами та модифікувати гормональний сигналінг^{142,143}. Встановлено, що кадмій асоціюється з порушеннями репродуктивної функції, безпліддям, тиреоїдною патологією та підвищеним ризиком гормонозалежних пухлин.

Особливе значення має конкурентна взаємодія між кадмієм і цинком. Кадмій здатний витіснити цинк із металозалежних ферментів, порушуючи їхню функцію та посилюючи ОС^{144,145,146}. Значна частина токсичних ефектів кадмію реалізується саме через мітохондріальну дисфункцію, генерацію ROS та порушення функціонування антиоксидантних систем.

3.6. Ртуть, нейротоксичність та епігенетичні ефекти

Ртуть належить до найбільш небезпечних нейротоксикантів сучасного довкілля. Особливу токсичність мають органічні форми ртуті, зокрема метилртуть, яка легко проникає через гематоенцефалічний та плацентарний бар'єри^{147,148}.

Основними механізмами токсичності ртуті є генерація ОС, порушення функціонування мітохондрій, зміни кальцієвого гомеостазу та активація нейрозапалення. Встановлено, що ртуть здатна індукувати ушкодження нейронів, порушення нейротрансмісії та когнітивні розлади^{149,150}.

Особливу небезпеку становить взаємодія ртуті та селену. Ртуть утворює стабільні комплекси Hg-Se, що призводить до функціонального дефіциту селену та виснаження антиоксидантного

¹³⁵ Ibid 131.

¹³⁶ Ibid 132.

¹³⁷ P.B. Tchounwou et al., 'Heavy Metal Toxicity and the Environment', *EXS*, vol. 101, 2012, pp. 133-164.

¹³⁸ M. Valko, H. Morri, and M.T.D. Cronin, 'Metals, Toxicity and Oxidative Stress', *Current Medicinal Chemistry*, vol. 12, no. 10, 2005, pp. 1161-1208.

¹³⁹ ATSDR, *Toxicological Profile for Cadmium*, Atlanta, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012.

¹⁴⁰ G. Genchi et al., 'The Effects of Cadmium Toxicity', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 11, 2020, 3782.

¹⁴¹ Ibid 137.

¹⁴² Ibid 139.

¹⁴³ Ibid 140.

¹⁴⁴ Ibid 139.

¹⁴⁵ Ibid 140.

¹⁴⁶ Ibid 138.

¹⁴⁷ ATSDR, *Toxicological Profile for Mercury*, Atlanta, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2022.

¹⁴⁸ G. Bjørklund et al., 'The Toxicology of Mercury: Current Research and Emerging Trends', *Environmental Research*, vol. 159, 2017, pp. 545-554.

¹⁴⁹ G. Bjørklund et al., 'The Toxicology of Mercury: Current Research and Emerging Trends', *Environmental Research*, vol. 159, 2017, pp. 545-554.

¹⁵⁰ J. Liu, R.A. Goyer and M.P. Waalkes, 'Toxic Effects of Metals', in *Casarett and Doull's Toxicology*, 9th ed., New York, McGraw-Hill, 2019.

захисту^{151,152}. Наявні дані також свідчать про здатність ртуті індукувати епігенетичні зміни, включаючи модифікації метилювання ДНК та дерегуляція мікроРНК.

3.7. Епігенетичні та трансгенераційні ефекти металотоксичності

Сучасні дослідження демонструють, що важкі метали здатні індукувати довготривалі епігенетичні порушення, які можуть реалізовуватися навіть через десятиліття після первинної експозиції^{153, 154, 155}. Встановлено, що свинець, кадмій, ртуть та арсен здатні змінювати патерни метилювання ДНК, модифікувати структуру хроматину та впливати на регуляцію експресії генів.

Особливо важливими є пренатальної експозиції та ранні періоди розвитку, коли епігенетичні механізми відіграють ключову роль у формуванні органів і систем. Відповідно до онтогенетичної концепції ініціації здоров'я та хвороб, токсичне навантаження у критичні періоди розвитку може програмувати ризик метаболічних, нейроендокринних та серцево-судинних захворювань у подальшому житті^{156,157,158}.

Таким чином, важкі метали є одним із центральних компонентів сучасного war exposome та формують складний мультирівневий токсикологічний вплив, який охоплює ОС, нейроендокринну дизрегуляцію, мітохондріальну дисфункцію, системне запалення та епігенетичне програмування. Умови сучасної війни значно посилюють ризики мультиметалевої експозиції, що створює довготривалі виклики для системи громадського здоров'я та екологічної безпеки.

4. PM2.5 ТА ТОКСИКОЛОГІЯ ГОРІННЯ У СТРУКТУРІ WAR EXPOSOME

4.1. Combustion toxicology як новий напрям сучасної екотоксикології

Одним із ключових компонентів сучасного war exposome є інтенсивне вдихання диму та продуктів горіння, що формується внаслідок масштабних пожеж промислових підприємств, нафтобаз, житлових кварталів, транспортної інфраструктури та складів боєприпасів^{159,160,161}. У процесі горіння утворюється складна суміш токсичних аерозолів, яка включає дрібнодисперсні частинки PM2.5, ультрадисперсні частинки, поліциклічні ароматичні вуглеводні, діоксини, фурани, чорний вуглець та численні леткі органічні сполуки.

Упродовж останніх десятиліть токсикологія горіння сформувалася як окремий напрям сучасної екологічної медицини, що вивчає системні біологічні ефекти продуктів горіння. Якщо раніше PM2.5 розглядалися переважно як респіраторний фактор ризику, то сучасні дослідження

¹⁵¹ G.W. Miller and D.P Jones, 'The Nature of Nurture: Refining the Definition of the Exposome', *Toxicological Sciences*, vol. 137, no. 1, 2014, pp. 1-2.

¹⁵² Ibid 147.

¹⁵³ L. Hou et al., 'Environmental Chemical Exposures and Human Epigenetics', *International Journal of Epidemiology*, vol. 41, no. 1, 2012, pp. 79-105.

¹⁵⁴ F. Perera and J. Herbstman, 'Prenatal Environmental Exposures, Epigenetics, and Disease', *Reproductive Toxicology*, vol. 31, no. 3, 2011, pp. 363-373.

¹⁵⁵ K. Vrijens, V. Bollati and T.S. Nawrot, 'MicroRNAs as Potential Signatures of Environmental Exposure or Effect: A Systematic Review', *Environmental Health Perspectives*, vol. 123, no. 5, 2015, pp. 399-411.

¹⁵⁶ D.J.P. Barker, 'The Developmental Origins of Adult Disease', *Journal of the American College of Nutrition*, vol. 23, no. 6, 2004, pp. 588S-595S.

¹⁵⁷ P.D. Gluckman and M.A. Hanson, 'Developmental Origins of Disease Paradigm: A Mechanistic and Evolutionary Perspective', *Pediatric Research*, vol. 56, no. 3, 2004, pp. 311-317.

¹⁵⁸ R. Barouki et al., 'Developmental Origins of Non-Communicable Disease: Implications for Research and Public Health', *Environmental Health*, vol. 11, 2012, 42.

¹⁵⁹ P.J. Landrigan et al., 'The Lancet Commission on Pollution and Health', *The Lancet*, vol. 391, no. 10119, 2018, pp. 462-512

¹⁶⁰ WHO, *Environmental Health in Emergencies and Disasters: A Practical Guide*, Geneva, World Health Organization, 2021.

¹⁶¹ UNEP, *Environmental Consequences of the War in Ukraine: Preliminary Assessment*, Nairobi, United Nations Environment Programme, 2022.

демонструють їхній системний вплив на серцево-судинну систему, ендокринну регуляцію, нейроімунні механізми та метаболічний гомеостаз^{162,163,164}.

Особливу небезпеку становлять ультрадисперсні частинки, діаметр яких становить менше 0,1 мкм. Завдяки малим розмірам вони здатні проникати через альвеоларно-капілярний бар'єр, потрапляти у системний кровотік та досягати центральної нервової системи^{165,166,167}. Крім того, поверхня таких частинок часто адсорбує важкі метали та органічні канцерогени, що суттєво підвищує їхню токсичність.

4.2. PM2.5 як системний токсикант

PM2.5 характеризуються здатністю індукувати системне запалення, ендотеліальну дисфункцію та ОС. Потрапляючи у дистальні відділи легень, дрібнодисперсні частинки активують альвеоларні макрофаги та стимулюють вивільнення прозапальних цитокінів^{168,169,170}. Це супроводжується активацією NF-κB-залежних сигнальних шляхів, генерацією ROS та розвитком хронічного запалення низької інтенсивності (ХЗНІ).

Сучасні епідеміологічні дослідження демонструють, що тривалий вплив PM2.5 асоціюється зі зростанням ризику артеріальної гіпертензії, ішемічної хвороби серця, інсульту, ЦД 2 типу та нейродегенеративних захворювань^{171,172,173}. Особливе значення має здатність дрібнодисперсних частинок порушувати функціонування судинного ендотелію та змінювати мікроциркуляцію.

У контексті war exposure PM2.5 є не лише компонентом атмосферного забруднення, але й універсальним переносником токсикантів. На поверхні дрібнодисперсних частинок можуть адсорбуватися важкі метали, поліциклічні ароматичні вуглеводні, діоксини та інші хімічні ЕД, що створює умови для комбінованої мультитоксичної експозиції^{174,175,176}.

4.3. Нейрозапалення та кардіометаболічні наслідки particulate exposure

Одним із найбільш значущих системних ефектів PM2.5 є здатність індукувати нейрозапалення та порушення функціонування центральної нервової системи. Сучасні дослідження демонструють, що ультрадисперсні частинки можуть проникати до мозку як через системний кровотік, так і через дихальну систему, минаючи гематоенцефалічний бар'єр^{177,178,179}.

Накопичення частинок у нервовій тканині супроводжується активацією мікроглії, генерацією ROS та розвитком хронічного нейрозапалення. Встановлено асоціацію між тривалим впливом

¹⁶² R.D. Brook et al., 'Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease', *Circulation*, vol. 121, no. 21, 2010, pp. 2331-2378.

¹⁶³ C.A. Pope and D.W. Dockery, 'Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines That Connect', *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 56, no. 6, 2006, pp. 709-742.

¹⁶⁴ D.E. Schraufnagel, 'The Health Effects of Ultrafine Particles', *Experimental & Molecular Medicine*, vol. 52, no. 3, 2020, pp. 311-317.

¹⁶⁵ Ibid 164.

¹⁶⁶ M.L. Block and L. Calderón-Garcidueñas, 'Air Pollution: Mechanisms of Neuroinflammation and CNS Disease', *Trends in Neurosciences*, vol. 32, no. 9, 2009, pp. 506-516.

¹⁶⁷ L.G. Costa et al., 'Neurotoxicity of Traffic-Related Air Pollution', *NeuroToxicology*, vol. 59, 2017, pp. 133-139.

¹⁶⁸ Ibid 162.

¹⁶⁹ Ibid 163.

¹⁷⁰ Ibid 166.

¹⁷¹ Ibid 162.

¹⁷² P.J. Landrigan et al., 'The Lancet Commission on Pollution and Health', *The Lancet*, vol. 391, no. 10119, 2018, pp. 462-512.

¹⁷³ L.G. Costa et al., 'Neurotoxicity of Traffic-Related Air Pollution', *NeuroToxicology*, vol. 59, 2017, pp. 133-139.

¹⁷⁴ Ibid 172.

¹⁷⁵ UNEP, *Environmental Consequences of the War in Ukraine: Preliminary Assessment*, Nairobi, United Nations Environment Programme, 2022.

¹⁷⁶ UNEP, *Frontiers 2022: Noise, Blazes and Mismatches*, Nairobi, United Nations Environment Programme, 2022.

¹⁷⁷ M.L. Block and L. Calderón-Garcidueñas, 'Air Pollution: Mechanisms of Neuroinflammation and CNS Disease', *Trends in Neurosciences*, vol. 32, no. 9, 2009, pp. 506-516.

¹⁷⁸ L.G. Costa et al., 'Neurotoxicity of Traffic-Related Air Pollution', *NeuroToxicology*, vol. 59, 2017, pp. 133-139.

¹⁷⁹ P. Grandjean and P.J. Landrigan, 'Neurobehavioural Effects of Developmental Toxicity', *The Lancet Neurology*, vol. 13, no. 3, 2014, pp. 330-338.

PM2.5 та підвищеним ризиком когнітивних порушень, депресії, тривожних розладів, хвороби Альцгеймера та інших нейродегенеративних процесів^{180,181,182}.

У структурі war exposome ці механізми мають особливе значення, оскільки токсичне навантаження поєднується з тяжким психоемоційним стресом, порушенням сну, посттравматичними розладами та хронічною активацією ГГН-осі. Комбінована дія психологічного стресу та впливу ультрадисперсних частинок створює умови для взаємного потенціювання нейроімунних порушень.

Крім нейротоксичних ефектів, PM2.5 суттєво впливають на кардіометаболічний гомеостаз. Хронічне запалення, ендотеліальна дисфункція та активація симпатичної нервової системи сприяють розвитку артеріальної гіпертензії, атеросклерозу та ІР^{183,184,185}. Встановлено, що тривала експозиція ультрадисперсними частинками асоціюється зі збільшенням ризику серцево-судинної смертності та передчасного старіння організму.

4.4. PM2.5 та ендокринна дизрегуляція

Упродовж останніх років дедалі більше уваги приділяється ролі PM2.5 у розвитку ендокринної патології. Доведено, що дрібнодисперсні частинки здатні порушувати функціонування ГГН-осі, впливати на тиреоїдний гомеостаз та модифікувати метаболізм стероїдних гормонів^{186,187,188}.

Значна частина цих ефектів реалізується через системне запалення та ОС. Хронічна активація прозапальних сигнальних шляхів супроводжується змінами чутливості тканин до інсуліну, порушенням секреції адипокінів та розвитком метаболічної дисфункції. Саме тому PM2.5 дедалі частіше розглядаються як важливий компонент обзогенного середовища.

Особливу небезпеку ультрадисперсне забруднення становить для вагітних жінок та дітей. Наявні дані свідчать про зв'язок пренатальної експозиції до PM2.5 з низькою масою тіла при народженні, порушенням нейропсихічного розвитку, бронхолегеневою патологією та змінами епігенетичного профілю потомства^{189,190,191}. У контексті війни ці ризики додатково посилюються через поєднання токсичного навантаження, хронічного стресу, нутритивного дефіциту та обмеженого доступу до медичної допомоги.

Таким чином, PM2.5 та продукти горіння є одним із центральних компонентів сучасного war exposome та формують системний мультирівневий токсичний вплив, який охоплює респіраторні, нейроендокринні, кардіометаболічні та епігенетичні механізми.

¹⁸⁰ Ibid 178.

¹⁸¹ Ibid 179.

¹⁸² L. Calderón-Garcidueñas et al., 'Brain Inflammation and Alzheimer's-Like Pathology in Individuals Exposed to Severe Air Pollution', *Toxicologic Pathology*, vol. 32, no. 6, 2004, pp. 650-658.

¹⁸³ R.D. Brook et al., 'Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease', *Circulation*, vol. 121, no. 21, 2010, pp. 2331-2378.

¹⁸⁴ C.A. Pope and D.W. Dockery, 'Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines That Connect', *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 56, no. 6, 2006, pp. 709-742.

¹⁸⁵ P.J. Landrigan et al., 'The Lancet Commission on Pollution and Health', *The Lancet*, vol. 391, no. 10119, 2018, pp. 462-512.

¹⁸⁶ A.C. Gore et al., 'EDC-2: The Endocrine Society's Second Scientific Statement on Endocrine-Disrupting Chemicals', *Endocrine Reviews*, vol. 36, no. 6, 2015, pp. E1-E150.

¹⁸⁷ J.J. Heindel et al., 'Metabolism Disrupting Chemicals and Metabolic Disorders', *Reproductive Toxicology*, vol. 68, 2017, pp. 3-33.

¹⁸⁸ L. Trasand, et al., 'Burden of Disease and Costs of Exposure to Endocrine Disrupting Chemicals in the European Union', *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, vol. 100, no. 4, 2015, pp. 1245-1255.

¹⁸⁹ F. Perera and J. Herbstman, 'Prenatal Environmental Exposures, Epigenetics, and Disease', *Reproductive Toxicology*, vol. 31, no. 3, 2011, pp. 363-373.

¹⁹⁰ R. Barouki et al., 'Developmental Origins of Non-Communicable Disease: Implications for Research and Public Health', *Environmental Health*, vol. 11, 2012, 42.

¹⁹¹ J.J. Heindel et al., 'Developmental Origins of Health and Disease: Integrating Environmental Influences', *Endocrinology*, vol. 156, no. 10, 2015, pp. 3416-3421.

5. WAR EXPOSOME ЯК ІНТЕГРАЛЬНА МОДЕЛЬ КУМУЛЯТИВНОЇ ЕКСПОЗИЦІЇ

5.1. Концепція кумулятивної експозиції у сучасній екологічній медицині

Традиційна токсикологія тривалий час ґрунтувалася на аналізі ізольованого впливу окремих токсикантів. Проте реальні умови навколишнього середовища характеризуються одночасною дією великої кількості хімічних, фізичних, біологічних та психосоціальних факторів^{192,193,194,195}. Саме тому сучасна екологічна медицина та гігієна довкілля дедалі більше орієнтуються на концепцію кумулятивної експозиції, яка розглядає сукупне навантаження усіх стресорів, що впливають на організм людини.

У межах цієї парадигми war exposome можна розглядати як одну з найбільш складних моделей кумулятивної експозиції. Війна створює унікальні умови, за яких населення одночасно піддається впливу токсичних аерозолів, важких металів, хімічних ЕД, інфекційних ризиків, хронічного психоемоційного стресу, нутритивного дефіциту та порушення соціальної інфраструктури^{196,197,198,199}.

Принциповою особливістю war exposome є взаємне потенціювання різних типів навантаження. Наприклад, психологічний стрес здатний посилювати токсичність ксенобіотиків через активацію ГГН-осі, порушення бар'єрних функцій та виснаження антиоксидантних систем. Водночас хронічна токсична експозиція може посилювати психоневрологічні розлади через нейрозапалення та мітохондріальну дисфункцію.

5.2. Аллостатичне навантаження та хронічна дезадаптація

Однією з ключових концепцій сучасної фізіології стресу є поняття аллостатичного навантаження, яке описує кумулятивне фізіологічне навантаження, що виникає внаслідок тривалої активації адаптаційних механізмів^{200,201,202}. У нормальних умовах системи реагування на стресовий чинник забезпечують короточасну адаптацію організму до зовнішніх викликів. Проте за умов хронічного стресу відбувається поступове виснаження регуляторних систем та формування аллостатичного навантаження.

У контексті війни аллостатичне навантаження формується внаслідок постійного поєднання психоемоційного стресу, токсичного навантаження, порушення сну, соціальної нестабільності та

¹⁹² C.P. Wild, 'Complementing the Genome with an "Exposome": The Outstanding Challenge of Environmental Exposure Measurement in Molecular Epidemiology', *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, vol. 14, no. 8, 2005, pp. 1847-1850.

¹⁹³ G.W. Miller and D.P. Jones, 'The Nature of Nurture: Refining the Definition of the Exposome', *Toxicological Sciences*, vol. 137, no. 1, 2014, pp. 1-2.

¹⁹⁴ S.M. Rappaport, 'Implications of the Exposome for Exposure Science', *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, vol. 21, no. 1, 2011, pp. 5-9.

¹⁹⁵ M. Vrijheid, 'The Exposome: A New Paradigm to Study the Impact of Environment on Health', *Thorax*, vol. 69, no. 9, 2014, pp. 876-878.

¹⁹⁶ P.J. Landrigan et al., 'The Lancet Commission on Pollution and Health', *The Lancet*, vol. 391, no. 10119, 2018, pp. 462-512.

¹⁹⁷ WHO, *Environmental Health in Emergencies and Disasters: A Practical Guide*, Geneva, World Health Organization, 2021.

¹⁹⁸ UNEP, *Environmental Consequences of the War in Ukraine: Preliminary Assessment*, Nairobi, United Nations Environment Programme, 2022.

¹⁹⁹ World Bank, *The Toll of War: The Economic and Social Consequences of the Conflict in Ukraine*, Washington DC, 2023.

²⁰⁰ H. Selye, 'Stress and the General Adaptation Syndrome', *British Medical Journal*, vol. 1, no. 4667, 1950, pp. 1383-1392.

²⁰¹ B.S. McEwen, 'Protective and Damaging Effects of Stress Mediators', *New England Journal of Medicine*, vol. 338, no. 3, 1998, pp. 171-179.

²⁰² B.S. McEwen and P. Tucker, 'Critical Biological Pathways for Chronic Psychosocial Stress and Research Opportunities to Advance the Consideration of Stress in Chemical Risk Assessment', *American Journal of Public Health*, vol. 101, suppl. 1, 2011, pp. S131-S139.

хронічної невизначеності. Це супроводжується гіперактивацією симпатичної нервової системи, порушенням секреції кортизолу, змінами циркадного ритму та розвитком системного ХЗНІ^{203, 204, 205}.

Сучасні дослідження демонструють, що високий рівень аллостатичного навантаження асоціюється зі зростанням ризику серцево-судинної патології, депресії, МС, імунної дисфункції та передчасного старіння^{206, 207, 208}. Таким чином, war exposome формує не лише токсикологічне, але й глибоке системне нейроендокринне навантаження.

5.3. Нейроімунні взаємодії у структурі war exposome

Одним із центральних напрямів сучасної екологічної медицини є вивчення нейроімунних взаємодій – складних взаємозв'язків між нервовою, імунною та ендокринною системами^{209, 210, 211}. У межах war exposome ці механізми набувають особливого значення, оскільки хронічний стрес та токсичне навантаження одночасно впливають на всі регуляторні системи організму.

Тривала активація шляху стрес-відповідь супроводжується змінами продукції цитокінів, порушенням функції мікроглії та дерегуляції нейро-ендокринних сигналів. Водночас хімічні ЕД та важкі метали здатні модифікувати імунну відповідь та підтримувати хронічне системне запалення^{212, 213, 214}.

Саме ХЗНІ сьогодні розглядається як один із ключових патогенетичних механізмів хронічних захворювань. Воно бере участь у розвитку атеросклерозу, нейродегенерації, ІР, депресії та канцерогенезу. Умови війни створюють передумови для формування довготривалого запального ушкодження на популяційному рівні.

5.4. Епігенетичне програмування та міжпоколінні наслідки війни

Однією з найбільш тривожних особливостей war exposome є потенційна здатність війни формувати довготривалі міжпоколінні наслідки. Сучасні дані свідчать про те, що хронічний стрес, токсична експозиція та нутритивний дефіцит здатні індукувати стійкі епігенетичні зміни^{215, 216, 217, 218}.

Епігенетичне програмування охоплює зміни метилювання ДНК, модифікації гістонів та дерегуляції мікроRNA, що може супроводжуватися тривалими змінами експресії генів. Особливо вразливими є критичні періоди розвитку, включаючи ембріогенез та раннє дитинство.

Відповідно до концепції теорії програмування здоров'я і хвороб у ранньому розвитку, токсичне та психоемоційне навантаження у пренатальному періоді може визначати ризик

²⁰³ Ibid 201.

²⁰⁴ Ibid 202.

²⁰⁵ G.M. Slavich, 'Psychoneuroimmunology of Stress and Mental Health', *Oxford Research Encyclopedia of Psychology*, 2020.

²⁰⁶ Ibid 202.

²⁰⁷ Ibid 205.

²⁰⁸ World Bank, *The Toll of War: The Economic and Social Consequences of the Conflict in Ukraine*, Washington DC, 2023.

²⁰⁹ M.L. Block and L. Calderón-Garcidueñas, 'Air Pollution: Mechanisms of Neuroinflammation and CNS Disease', *Trends in Neurosciences*, vol. 32, no. 9, 2009, pp. 506-516.

²¹⁰ Ibid 201.

²¹¹ Ibid 206.

²¹² A.C. Gore et al., 'EDC-2: The Endocrine Society's Second Scientific Statement on Endocrine-Disrupting Chemicals', *Endocrine Reviews*, vol. 36, no. 6, 2015, pp. E1-E150.

²¹³ P.B. Tchounwou et al., 'Heavy Metal Toxicity and the Environment', *EXS*, vol. 101, 2012, pp. 133-164.

²¹⁴ B.S. McEwen and P. Tucker, 'Critical Biological Pathways for Chronic Psychosocial Stress and Research Opportunities to Advance the Consideration of Stress in Chemical Risk Assessment', *American Journal of Public Health*, vol. 101, suppl. 1, 2011, pp. S131-S139.

²¹⁵ L. Hou et al., 'Environmental Chemical Exposures and Human Epigenetics', *International Journal of Epidemiology*, vol. 41, no. 1, 2012, pp. 79-105.

²¹⁶ F. Perera and J. Herbstman, 'Prenatal Environmental Exposures, Epigenetics, and Disease', *Reproductive Toxicology*, vol. 31, no. 3, 2011, pp. 363-373.

²¹⁷ R. Barouki et al., 'Developmental Origins of Non-Communicable Disease: Implications for Research and Public Health', *Environmental Health*, vol. 11, 2012, 42.

²¹⁸ K. Vrijens, V. Bollati and T.S. Nawrot, 'MicroRNAs as Potential Signatures of Environmental Exposure or Effect: A Systematic Review', *Environmental Health Perspectives*, vol. 123, no. 5, 2015, pp. 399-411.

метаболічних, нейропсихічних та ендокринних захворювань упродовж усього життя^{219,220,221}. Таким чином, war exposome здатний впливати не лише на поточний стан громадського здоров'я, але й на майбутні покоління.

6. ВРАЗЛИВІ ГРУПИ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ WAR EXPOSOME

6.1. Вагітні жінки та пренатальна вразливість

Вагітні жінки належать до найбільш вразливих категорій населення в умовах war exposome. Під час вагітності відбуваються масштабні гормональні, імунологічні та метаболічні зміни, які забезпечують розвиток плода, але водночас підвищують чутливість організму до токсичних впливів^{222,223,224}.

Особливу небезпеку становить здатність багатьох хімічних ЕД, важких металів та ультрадисперсних частинок проникати через плацентарний бар'єр. Встановлено, що пренатальна експозиція до свинцю, кадмію, PM2.5 та поліциклічних ароматичних вуглеводнів асоціюється з порушенням внутрішньоутробного розвитку, низькою масою тіла при народженні, передчасними пологами та змінами нейропсихічного розвитку дитини^{225,226,227}.

Хронічний стрес, характерний для умов війни, додатково посилює ризики через гіперактивацію ГГН-осі та порушення плацентарної регуляції кортизолу. Сучасні дослідження демонструють, що стрес матері здатний впливати на фетальне програмування та формувати довготривалі нейроендокринні наслідки у потомства.

6.2. Діти як найбільш чутлива популяція

Дитячий організм характеризується підвищеною чутливістю до токсичних речовин навколишнього середовища через незрілість систем детоксикації, високу інтенсивність метаболізму та активні процеси росту й диференціації тканин^{228,229,230}. У дітей спостерігається вища абсорбція багатьох токсикантів, а гематоенцефалічний бар'єр є більш проникним порівняно з дорослими.

Особливу небезпеку для дітей становлять нейротоксичні ефекти свинцю, ртуті та PM2.5. Навіть низькі концентрації цих токсикантів асоціюються зі зниженням когнітивних функцій, порушенням поведінки, дефіцитом уваги та нейропсихічними розладами^{231,232,233}.

Крім токсичного навантаження, діти в умовах війни піддаються тяжкому психоемоційному стресу, вимушеній міграції, порушенню доступу до освіти та медичної допомоги. Комбінована дія

²¹⁹ D.J.P. Barker, 'The Developmental Origins of Adult Disease', *Journal of the American College of Nutrition*, vol. 23, no. 6, 2004, pp. 588S-595S.

²²⁰ P.D. Gluckman and M.A. Hanson, 'Developmental Origins of Disease Paradigm: A Mechanistic and Evolutionary Perspective', *Pediatric Research*, vol. 56, no. 3, 2004, pp. 311-317.

²²¹ J.J. Heindel et al., 'Developmental Origins of Health and Disease: Integrating Environmental Influences', *Endocrinology*, vol. 156, no. 10, 2015, pp. 3416-3421.

²²² C. Gundacke, and M. Hengstschläger, 'The Role of the Placenta in Fetal Exposure to Heavy Metals', *Wiener Medizinische Wochenschrift*, vol. 162, no. 9-10, 2012, pp. 201-206.

²²³ Ibid 216.

²²⁴ Ibid 217.

²²⁵ ATSDR, *Toxicological Profile for Lead*, Atlanta, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2020.

²²⁶ ATSDR, *Toxicological Profile for Cadmium*, Atlanta, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012.

²²⁷ Ibid 216.

²²⁸ P.J. Landrigan and R.A. Etzel, *Textbook of Children's Environmental Health*, Oxford University Press, 2014.

²²⁹ P. Grandjean, *Only One Chance: How Environmental Pollution Impairs Brain Development and How to Protect the Brains of Next Generation*, Oxford University Press, 2013.

²³⁰ WHO, *Air Pollution and Child Health: Prescribing Clean Air*, Geneva, World Health Organization, 2018.

²³¹ P. Grandjean and P.J. Landrigan, 'Neurobehavioural Effects of Developmental Toxicity', *The Lancet Neurology*, vol. 13, no. 3, 2014, pp. 330-338.

²³² D.C. Bellinger, 'Very Low Lead Exposures and Children's Neurodevelopment', *Current Opinion in Pediatrics*, vol. 20, no. 2, 2008, pp. 172-177.

²³³ B.P. Lanphear et al., 'Low-Level Environmental Lead Exposure and Children's Intellectual Function', *Environmental Health Perspectives*, vol. 113, no. 7, 2005, pp. 894-899.

токсичних і психосоціальних факторів створює ризик довготривалих порушень фізичного та психічного розвитку.

6.3. Військовослужбовці та професійна токсична експозиція

Окрему групу високого ризику становлять військовослужбовці, які безпосередньо контактують із продуктами детонації боєприпасів, горіння техніки, металовмісними аерозолями та забруднювачами, похідними від процесів горіння^{234,235,236}.

У сучасній військовій токсикології дедалі більше уваги приділяється хронічній експозиції низькими дозами, яка може тривалий час залишатися субклінічною, але поступово призводити до розвитку респіраторної дисфункції, нейрокогнітивного ушкодження, дизрегуляції ендокринної системи та розвитку хронічних запальних захворювань.

Особливе значення має поєднання токсичного навантаження з тяжким психологічним стресом, порушенням сну та надмірним фізичним виснаженням. Таке комбіноване навантаження здатне формувати складні нейроендокринні та нейроімунні ушкодження, що можуть зберігатися навіть після завершення бойових дій.

7. ПЕРСПЕКТИВИ БІОМОНІТОРИНГУ ТА ГРОМАДСЬКОГО ЗДОРОВ'Я У СИСТЕМІ WAR EXPOSOME

7.1. Біомоніторинг як основа сучасної екологічної медицини

Умови сучасних воєнних конфліктів створюють необхідність формування нових підходів до оцінки експозиції до токсичних чинників і кумулятивного впливу довкілля. Одним із ключових напрямів сучасної екологічної медицини є біомоніторинг - система виявлення токсикантів, їхніх метаболітів або біомаркерів ефекту у біологічних середовищах людини^{237,238,239,240}.

Сучасний біомоніторинг включає визначення важких металів у крові, сечі, волоссі та нігтях, аналіз хімічних ЕД, дослідження маркерів ОС, системного запалення та епігенетичних змін. В умовах war exposome особливого значення набуває формування довготривалих систем популяційного епіднадзора.

Перспективним напрямом є розвиток експосоміки – інтегрального підходу, що об'єднує високопродуктивні аналітичні технології, омїкс-платформи та комп'ютерне моделювання для комплексної оцінки накопиченої експозиції^{241,242,243,244}. Такий підхід дозволяє аналізувати не окремі токсиканти, а повний спектр зовнішніх впливів, що діють на організм людини.

²³⁴ WHO, *Environmental Health in Emergencies and Disasters: A Practical Guide*, Geneva, World Health Organization, 2021.

²³⁵ UNEP, *Environmental Consequences of the War in Ukraine: Preliminary Assessment*, Nairobi, United Nations Environment Programme, 2022.

²³⁶ UNEP, *Addressing Environmental Consequences of Armed Conflicts*, Nairobi, 2020.

²³⁷ C.P. Wild, 'Complementing the Genome with an "Exposome": The Outstanding Challenge of Environmental Exposure Measurement in Molecular Epidemiology', *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, vol. 14, no. 8, 2005, pp. 1847-1850.

²³⁸ G.W. Miller and D.P. Jones, 'The Nature of Nurture: Refining the Definition of the Exposome', *Toxicological Sciences*, vol. 137, no. 1, 2014, pp. 1-2.

²³⁹ S.M. Rappaport, 'Implications of the Exposome for Exposure Science', *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, vol. 21, no. 1, 2011, pp. 5-9.

²⁴⁰ WHO, *Chemical Safety and Health*, Geneva, World Health Organization, 2020.

²⁴¹ C.P. Wild, 'Complementing the Genome with an "Exposome": The Outstanding Challenge of Environmental Exposure Measurement in Molecular Epidemiology', *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, vol. 14, no. 8, 2005, pp. 1847-1850.

²⁴² G.W. Miller and D.P. Jones, 'The Nature of Nurture: Refining the Definition of the Exposome', *Toxicological Sciences*, vol. 137, no. 1, 2014, pp. 1-2.

²⁴³ S.M. Rappaport, 'Implications of the Exposome for Exposure Science', *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, vol. 21, no. 1, 2011, pp. 5-9.

²⁴⁴ M. Vrijheid, 'The Exposome: A New Paradigm to Study the Impact of Environment on Health', *Thorax*, vol. 69, no. 9, 2014, pp. 876-878.

7.2. Епіднагляд за стічними водами та моніторинг довкілля

Важливим компонентом сучасного екологічного епіднагляду є епідеміологія, що базується на аналізі стічних вод, яка дає змогу оцінювати рівень забруднення токсикантами на популяційному рівні^{245,246,247}. Аналіз стічних вод може застосовуватися для моніторингу важких металів, залишків лікарських засобів, PFAS, ЕД та інших забруднювачів довкілля.

У післявоєнний період особливого значення набуває комплексний екологічний моніторинг ґрунтів, водних систем та атмосферного повітря. Саме тривала персистенція токсикантів може підтримувати хронічний вплив факторів довкілля навіть через роки після завершення активної фази бойових дій.

7.3. Прецизійний підхід до охорони здоров'я довкілля та персоналізована профілактика

Сучасна наука про екологічне здоров'я дедалі більше спирається на концепцію прецизійного екологічного здоров'я, що передбачає індивідуалізовану оцінку ризиків і персоналізовані профілактичні стратегії^{248,249,250}. Встановлено, що чутливість до екологічних токсикантів детермінується комплексом генетичних, епігенетичних, метаболічних і соціальних чинників. У перспективі інтеграція експосоміки, системної біології, методів штучного інтелекту та біомаркер-орієнтованої діагностики може забезпечити розробку персоналізованих моделей оцінки кумулятивної експозиції та прогнозування ризику формування хронічного тягаря захворюваності. Для країн, що зазнали впливу масштабних воєнних конфліктів, імплементація подібних систем є критично значущою з позицій довготривалого забезпечення громадського здоров'я.

ВИСНОВКИ

Сучасні воєнні конфлікти формують принципово новий тип глобального медико-екологічного навантаження, який виходить далеко за межі традиційних уявлень про бойову травму та гострі наслідки війни. Руйнування промислової інфраструктури, масштабні пожежі, детонація боєприпасів, контамінація ґрунтів і водних систем створюють умови для формування складного мультитоксичного середовища, здатного впливати на здоров'я населення протягом багатьох десятиліть.

Концепція war exposome дозволяє розглядати сучасну війну як інтегральну модель кумулятивної експозиції, у межах якої одночасно реалізуються токсикологічні, нейроендокринні, імунологічні, метаболічні та психосоціальні механізми впливу. Особливе значення у структурі war exposome мають ЕД, важкі метали, РМ2.5 та продукти горіння, які здатні формувати довготривале системне запалення, ОС, мітохондріальну дисфункцію та епігенетичні порушення.

Найбільш вразливими до токсичної експозиції є вагітні жінки, діти, військовослужбовці та населення територій активних бойових дій. Особливе занепокоєння становлять потенційні трансгенераційні ефекти, пов'язані з епігенетичним програмуванням та концепцією внутрішньоутробного походження хронічних захворювань. Сучасна екологічна медицина потребує переходу від аналізу ізольованих токсикантів до інтегральних моделей оцінки кумулятивного екологічного навантаження. У цьому контексті особливого значення набувають біомоніторинг, експосоміка, епіднагляд за стічними водами та прецизійна екологічна медицина.

Таким чином, war exposome слід розглядати не лише як екологічний або токсикологічний феномен, а й як один із ключових глобальних викликів сучасному громадському здоров'ю, що потребує міждисциплінарної інтеграції токсикології, ендокринології, екологічної медицини, епідеміології та наук про громадське здоров'я.

²⁴⁵ P.J. Landrigan et al., 'The Lancet Commission on Pollution and Health', *The Lancet*, vol. 391, no. 10119, 2018, pp. 462-512.

²⁴⁶ WHO, *Environmental Health in Emergencies and Disasters: A Practical Guide*, Geneva, World Health Organization, 2021.

²⁴⁷ WHO, *Chemical Safety and Health*, Geneva, World Health Organization, 2020.

²⁴⁸ Ibid 241.

²⁴⁹ Ibid 242.

²⁵⁰ P.J. Landrigan et al., 'The Lancet Commission on Pollution and Health', *The Lancet*, vol. 391, no. 10119, 2018, pp. 462-512.

**ПІДГОТОВКА МЕДИЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ З ПИТАНЬ
ІМУНОПРОФІЛАКТИКИ ЯК СКЛАДОВА БІОБЕЗПЕКИ В УМОВАХ
ВІЙНИ: РЕЗУЛЬТАТИ ОПИТУВАННЯ У ДОНЕЦЬКІЙ ОБЛАСТІ**

**TRAINING OF MEDICAL PRACTITIONERS FOR NUTRITION AND
IMMUNOPROPHYLAISIS YAK SKLADOVA BIOSAFETY IN THE MINDS OF
VINEY: RESULTS OF EXPERIMENT IN THE DONETSK REGION**

Скрипник Сергій Леонідович, генеральний директор, Державна установа «Донецький обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України», prof.med.don@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-2283-4209>

Біломеря Тамара Анатоліївна, кандидат медичних наук, заступник генерального директора з контролю та профілактики інфекційних хвороб, Державна установа «Донецький обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України», belomerya@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0002-0574-7122>

Шишова Галина Андріївна, завідувач відділу імунопрофілактики, Державна установа «Донецький обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України», Shyshova@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0003-2604-5442>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.19>

Анотація. У статті представлено результати оцінювання рівня знань медичних працівників Донецької області з питань імунопрофілактики в умовах воєнного стану як складової системи біобезпеки та епідемічної стійкості регіону. Дослідження проведено у квітні 2026 року шляхом анонімного онлайн-опитування 461 медичного працівника із використанням Google Forms. Проаналізовано рівень обізнаності респондентів щодо календаря профілактичних щеплень, холодового ланцюга, несприятливих подій після імунізації (НППІ), комунікації з пацієнтами та організації вакцинації у прифронтових умовах. Встановлено високий рівень правильних відповідей щодо ревакцинації проти дифтерії та правця, вакцинації БЦЖ новонароджених, забезпечення холодового моніторингу та доказової комунікації з пацієнтами. Водночас визначено окремі прогалини у знаннях щодо програмних помилок імунізації та класифікації НППІ. Отримані результати підтверджують необхідність систематичного професійного навчання медичних працівників з питань вакцинації та біобезпеки в умовах надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: імунопрофілактика, вакцинація, біобезпека, медичні працівники, НППІ, холодовий ланцюг, війна, Донецька область.

Abstract. The article presents the results of assessing the level of knowledge of healthcare workers in Donetsk region regarding immunoprophylaxis under martial law as a component of biosafety and epidemiological resilience. The study was conducted in April 2026 through an anonymous online survey of 461 healthcare workers using Google Forms. The respondents' awareness of vaccination schedules, cold chain maintenance, adverse events following immunization (AEFI), communication with patients, and organization of vaccination services in frontline conditions was analyzed. A high level of correct responses was identified regarding diphtheria and tetanus revaccination, BCG vaccination of newborns, cold chain monitoring, and evidence-based communication with patients. At the same time, certain gaps in knowledge

related to immunization program errors and AEFI classification were identified. The obtained results confirm the necessity of systematic professional training of healthcare workers on vaccination and biosafety during emergencies.

Keywords: immunoprophylaxis, vaccination, biosafety, healthcare workers, AEFI, cold chain, war, Donetsk region.

1. ВСТУП

Повномасштабна війна в Україні суттєво вплинула на функціонування системи охорони здоров'я та створила додаткові ризики для епідемічної безпеки населення. Руйнування медичної інфраструктури, вимушене переміщення населення, порушення логістики постачання медичних імунобіологічних препаратів та зниження доступності профілактичних щеплень формують умови для погіршення епідемічної ситуації щодо вакцинокерованих інфекцій^{1,2,3}.

В умовах війни особливого значення набуває система біобезпеки та біозахисту, важливою складовою якої є підтримання належного рівня охоплення імунопрофілактикою населення⁴. Одним із ключових чинників забезпечення епідемічної стійкості є рівень підготовки медичних працівників щодо організації вакцинації, дотримання вимог холодового ланцюга, виявлення та моніторингу несприятливих подій після імунізації, а також комунікації з населенням.

Актуальність проблеми підтверджується епідемічною ситуацією в Україні. Незважаючи на зниження рівня захворюваності на кашлюк у 2025 році порівняно з 2024 роком, в країні продовжують реєструватися випадки кору, епідемічного паротиту та інших вакцинокерованих інфекцій. У воєнний період ризики поширення інфекцій значно підвищуються через порушення доступу населення до медичних послуг та профілактичних щеплень.

Метою дослідження стало оцінювання рівня знань медичних працівників Донецької області з питань імунопрофілактики як складової системи біобезпеки в умовах війни.

2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проведено у квітні 2026 року шляхом анонімного онлайн-опитування медичних працівників Донецької області із використанням Google Forms. До участі в опитуванні були залучені лікарі первинної ланки, педіатри, терапевти, медичні сестри, медичні брати, фельдшери та інші медичні працівники.

Таблиця 1

Характеристика респондентів дослідження

Показник	Кількість (n)	%
Лікарі	154	33,4
Молодший медичний персонал	307	66,6
Жінки	436	94,6
Чоловіки	25	5,4
Місто	363	78,4
Селище	51	11,1
Село	47	10,5

¹ Закон України «Про систему громадського здоров'я» : від 06.09.2022 № 2573-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#Text>

² Закон України «Про захист населення від інфекційних хвороб» : від 06.04.2000 № 1645-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1645-14#Text>

³ World Health Organization. Vaccines and immunization. URL: <https://www.who.int/health-topics/vaccines-and-immunization>

⁴ Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Стратегії розвитку імунопрофілактики та захисту населення від вакцинокерованих інфекцій до 2030 року» : від 30.11.2022 № 1169-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1169-2022-%D1%80#Text>

У дослідженні взяли участь 461 медичний працівник Донецької області, серед яких 154 лікарі (33,4%) та 307 представників молодшого медичного персоналу (66,6%). Переважну більшість респондентів становили жінки — 436 осіб (94,6%), тоді як чоловіки становили 25 осіб (5,4%).

За місцем проживання більшість учасників були мешканцями міської місцевості — 363 особи (78,4 %). У селищах проживали 51 респондент (11,1%), у сільській місцевості — 47 осіб (10,5%).

Під час аналізу вікової структури встановлено, що найбільшу частку респондентів становили медичні працівники віком 45–59 років — 234 особи (50,8%). У віці 60 років і старше перебували 107 учасників (23,2%), 35–44 роки — 82 особи (17,8%), 25–34 роки — 34 особи (7,4%). Найменшу частку становили респонденти віком 18–24 роки — 3 особи (0,6%) та молодші 18 років — 1 особа (0,2%).

Отримані результати свідчать, що основну частину вибірки становили досвідчені медичні працівники середнього та старшого віку, які безпосередньо залучені до організації та проведення профілактичних щеплень у прифронтовому регіоні.

Опитувальник включав блоки питань щодо:

- загальних основ імунопрофілактики;
- календаря профілактичних щеплень;
- холодового ланцюга;
- несприятливих подій після імунізації;
- комунікації з пацієнтами;
- колективного імунітету;
- вакцинації у прифронтових умовах;
- організації імунізації населення.

Аналіз результатів здійснювався шляхом визначення абсолютних та відносних показників.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Результати дослідження продемонстрували загалом високий рівень обізнаності медичних працівників з питань імунопрофілактики.

Під час аналізу відповідей встановлено, що 95,2% респондентів правильно визначили необхідність ревакцинації дорослих проти дифтерії та правця кожні 10 років⁵ [9]. Водночас 98,9% учасників правильно визначили вакцинацію БЦЖ як щеплення, що проводиться новонародженим у перші дні життя⁶ [9].

Таблиця 2

Основні бар'єри до вакцинації з точки зору медичних працівників

Фактор	n	%
Страх побічних реакцій	140	30,4
Недовіра до вакцин	101	21,9
Безпекова ситуація	76	16,5
Відсутність часу	52	11,3
Недостатня інформація	34	7,4
Незручний графік роботи	19	4,1
Відсутність доступу до пункту щеплення	14	3,0

⁵ Наказ МОЗ України «Про затвердження Календаря профілактичних щеплень в Україні» : від 16.09.2011 № 595. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1159-11#Text>

⁶ Теж саме, 5.

Серед факторів, які перешкоджають вакцинації, респонденти найчастіше зазначали страх побічних реакцій — 140 осіб (30,4%), недовіру до вакцин — 101 особа (21,9%) та безпекову ситуацію — 76 учасників (16,5%). Відсутність часу як бар'єр до вакцинації визначили 52 респонденти (11,3%), недостатню інформацію — 34 особи (7,4%), незручний графік роботи пунктів щеплень — 19 осіб (4,1%), а відсутність доступу до пункту щеплення — 14 учасників (3%).

Встановлено, що представники молодшого медичного персоналу порівняно з лікарями частіше повідомляли про страх щодо побічних реакцій та недовіру до вакцин. Водночас лікарі частіше вказували на дефіцит часу як фактор, що перешкоджає проведенню вакцинації.

Основним джерелом довіри щодо інформації про вакцинацію респонденти визначили медичних працівників — 317 осіб (68,8%), тоді як офіційним джерелам довіряли 140 учасників (30,4%). Рівень довіри до соціальних мереж виявився мінімальним — лише 1 респондент (0,2%).

Таблиця 3

Результати оцінювання знань щодо холодового ланцюга

Показник	n	%
Правильні дії при порушенні температурного режиму	446	96,7
Правильне визначення холодового моніторингу	457	99,1

Високий рівень знань встановлено і щодо забезпечення холодового ланцюга. Так, 96,7% респондентів зазначили, що при порушенні температурного режиму зберігання вакцин необхідно тимчасово ізолювати вакцину та повідомити відповідальних осіб. Крім того, 99,1% учасників правильно визначили холодовий моніторинг як контроль температури під час транспортування і зберігання вакцин.

Таблиця 4

Результати оцінювання знань щодо НППІ

Показник	n	%
Правильне визначення програмної помилки імунізації	266	57,7
Правильне визначення НППІ через порушення холодового ланцюга	361	78,3
Правильне визначення інфекції через порушення стерильності	365	79,2

Виявлені прогалини у знаннях щодо класифікації НППІ та програмних помилок імунізації можуть негативно впливати на своєчасність виявлення, розслідування та профілактики несприятливих подій після щеплень. В умовах інформаційного навантаження та поширення дезінформації такі помилки здатні формувати недовіру населення до вакцинації та знижувати рівень прихильності до профілактичних щеплень.

Особливу увагу необхідно приділяти практичним аспектам безпечного введення вакцин, дотриманню стерильності, правильному транспортуванню медичних імунобіологічних препаратів та алгоритмам реагування на НППІ.

Отримані результати свідчать про високий рівень практичної підготовки медичних працівників щодо забезпечення належного температурного режиму зберігання та транспортування вакцин. Це має особливе значення для Донецької області в умовах воєнного стану, оскільки порушення логістики, переміщення медичних закладів та нестабільне енергозабезпечення можуть

створювати додаткові ризики порушення холодового ланцюга та втрати ефективності медичних імунобіологічних препаратів^{7,8}.

Таблиця 5**Комунікація та організація вакцинації**

Показник	n	%
Необхідність доказової комунікації	460	99,8
Рекомендація лікаря як фактор довіри	443	96,1
Доступність вакцинації як фактор охоплення	449	97,4
Необхідність мобільних форм вакцинації	445	96,5

Значна частина медичних працівників продемонструвала високий рівень підготовки у сфері комунікації щодо вакцинації. Зокрема, 99,8% респондентів вказали, що при сумнівах пацієнта необхідно надавати доказову інформацію та пояснення, а 96,1% визначили рекомендацію лікаря як найефективніший чинник підвищення довіри до вакцинації.

Під час оцінювання організаційних аспектів імунопрофілактики 97,4% респондентів зазначили, що підвищенню охоплення вакцинацією сприяє інформування населення та доступність послуг. Водночас 96,5% учасників визначили пріоритетом у прифронтових умовах гнучку організацію послуг імунізації та мобільні форми вакцинації.

Окрему увагу приділено оцінці ставлення медичних працівників до вакцинації. Встановлено, що 87,6% респондентів ніколи не відмовлялися від щеплень, а 69,8% готові надолужити пропущені вакцинації. Основними джерелами довіри щодо інформації про вакцинацію респонденти визначили медичних працівників (68,8 %) та офіційні джерела інформації (30,4%).

Під час дослідження також встановлено окремі проблемні аспекти щодо розуміння класифікації та причин НППІ. Так, лише 57,7% респондентів правильно визначили програмну помилку імунізації як помилки при транспортуванні, зберіганні чи введенні вакцин, тоді як 39,3% учасників помилково пов'язували її виключно з неправильним календарем щеплень.

Крім того, 78,31% опитаних правильно визначили порушення холодового ланцюга або техніки введення як причину НППІ через помилку імунізації, що свідчить про наявність окремих прогалин у знаннях частини медичних працівників. Також лише 79,17% респондентів правильно віднесли інфекцію через порушення стерильності під час ін'єкції до НППІ через помилку імунізації.

Отримані результати свідчать про необхідність подальшого професійного навчання медичних працівників, особливо щодо класифікації НППІ, програмних помилок імунізації та забезпечення безпеки вакцинації в умовах війни.

4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати свідчать про загалом високий рівень обізнаності медичних працівників Донецької області з питань імунопрофілактики, що є важливим компонентом системи біобезпеки та епідемічної стійкості в умовах воєнного стану. Високий рівень правильних відповідей щодо календаря профілактичних щеплень, холодового ланцюга та комунікації з пацієнтами демонструє

⁷ Закон України «Про систему громадського здоров'я» : від 06.09.2022 № 2573-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#Text>

⁸ Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Стратегії розвитку імунопрофілактики та захисту населення від вакцинно-керованих інфекцій до 2030 року» : від 30.11.2022 № 1169-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1169-2022-%D1%80#Text>

достатню професійну підготовку медичних працівників до організації вакцинації навіть у складних умовах прифронтового регіону^{9,10}.

Особливо важливими є результати щодо забезпечення холодового ланцюга. Більшість респондентів правильно визначили алгоритми дій при порушенні температурного режиму зберігання вакцин та принципи холодового моніторингу. Це має принципове значення в умовах війни, коли пошкодження енергетичної інфраструктури, перебої електропостачання, евакуація медичних закладів та порушення логістичних маршрутів можуть негативно впливати на якість і безпечність медичних імунобіологічних препаратів^{11,12}.

Водночас результати дослідження продемонстрували наявність окремих прогалин у знаннях щодо класифікації несприятливих подій після імунізації та програмних помилок імунізації. Лише 57,7% респондентів правильно визначили сутність програмної помилки імунізації, а частина учасників помилково пов'язували її виключно з порушенням календаря щеплень. Такі результати можуть свідчити про недостатню практичну підготовку окремих медичних працівників щодо сучасних підходів до фармаконагляду та моніторингу безпеки вакцинації.

Особливої уваги потребують результати щодо НППІ через помилку імунізації. Хоча більшість респондентів правильно визначили порушення холодового ланцюга та недотримання техніки введення вакцин як можливі причини НППІ, частина медичних працівників продемонструвала недостатній рівень знань щодо причин виникнення інфекційних ускладнень після щеплень. Це може негативно впливати на своєчасність виявлення, розслідування та профілактики несприятливих подій після імунізації, а також формувати ризики зниження довіри населення до вакцинації¹³.

Результати дослідження також підтвердили важливу роль медичних працівників у формуванні прихильності населення до вакцинації. Основним джерелом довіри щодо інформації про профілактичні щеплення респонденти визначили саме медичних працівників, тоді як рівень довіри до соціальних мереж був мінімальним. Отримані результати узгоджуються з міжнародними рекомендаціями WHO та UNICEF, відповідно до яких саме медичні працівники залишаються ключовою ланкою протидії дезінформації щодо вакцинації та формування довіри до імунопрофілактики^{14,15}.

Важливим аспектом дослідження стало виявлення факторів, які перешкоджають вакцинації навіть серед медичних працівників. Найчастіше респонденти зазначали страх побічних реакцій, недовіру до вакцин та безпекову ситуацію у регіоні. Це свідчить про те, що навіть медичні працівники в умовах війни залишаються вразливими до психологічного навантаження, професійного вигорання та інформаційного впливу. При цьому представники молодшого медичного персоналу частіше повідомляли про недовіру до вакцинації та побоювання щодо побічних реакцій порівняно з лікарями, що може бути пов'язано з різницею у професійній підготовці та доступі до доказової медичної інформації.

⁹ Закон України «Про систему громадського здоров'я» : від 06.09.2022 № 2573-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#Text>

¹⁰ Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Стратегії розвитку імунопрофілактики та захисту населення від вакцинокерованих інфекцій до 2030 року» : від 30.11.2022 № 1169-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1169-2022-%D1%80#Text>

¹¹ Теж саме, 10.

¹² World Health Organization. Immunization in emergencies. URL: <https://www.who.int/teams/immunization-vaccines-and-biologicals/emergencies>

¹³ Centers for Disease Control and Prevention. Vaccine Safety. URL: <https://www.cdc.gov/vaccinesafety/index.html>

¹⁴ World Health Organization. Vaccines and immunization. URL: <https://www.who.int/health-topics/vaccines-and-immunization>

¹⁵ UNICEF. Immunization. URL: <https://www.unicef.org/immunization> (дата звернення: 19.05.2026).

Окремої уваги заслуговують результати щодо вакцинації в умовах війни та прифронтових територій. Переважна більшість респондентів підтримували необхідність гнучкої організації послуг імунізації, мобільних форм вакцинації та адаптації системи охорони здоров'я до умов надзвичайних ситуацій. Такі результати свідчать про розуміння медичними працівниками необхідності підтримання безперервності імунопрофілактики навіть в умовах обмеженого доступу населення до медичних послуг^{16,17}.

В умовах повномасштабної війни система імунопрофілактики стикається з додатковими викликами, серед яких внутрішнє переміщення населення, руйнування медичної інфраструктури, кадровий дефіцит, порушення логістики постачання вакцин та підвищене навантаження на медичних працівників. У таких умовах професійна підготовка медичного персоналу повинна розглядатися не лише як освітній компонент, а як важливий елемент національної системи біобезпеки та біозахисту^{18,19}.

Отримані результати підтверджують необхідність подальшого розвитку системи безперервного професійного навчання медичних працівників з питань імунопрофілактики²⁰. Особливого значення набувають навчальні програми щодо:

- безпечного введення вакцин;
- забезпечення холодового ланцюга;
- моніторингу НППІ;
- кризових комунікацій;
- вакцинації внутрішньо переміщених осіб;
- організації мобільних форм імунізації;
- вакцинації в умовах надзвичайних ситуацій та воєнного стану.

Таким чином, результати дослідження демонструють, що підготовка медичних працівників з питань імунопрофілактики є важливим компонентом забезпечення епідемічної стійкості населення та підтримання системи біобезпеки в умовах війни.

Дослідження має певні обмеження, пов'язані з онлайн-форматом опитування, добровільною участю респондентів та регіональним характером вибірки. Водночас отримані результати дозволяють оцінити актуальний рівень підготовки медичних працівників щодо імунопрофілактики в умовах воєнного стану та визначити пріоритетні напрями подальшого професійного навчання.

5. ВИСНОВКИ

1. Медичні працівники Донецької області продемонстрували загалом високий рівень знань з питань імунопрофілактики, зокрема щодо календаря профілактичних щеплень, забезпечення холодового ланцюга та доказової комунікації з пацієнтами.

2. Найвищий рівень правильних відповідей встановлено щодо ревакцинації проти дифтерії та правця, вакцинації БЦЖ новонароджених та організації холодового моніторингу, що свідчить про достатню практичну підготовку медичних працівників у сфері забезпечення безпеки вакцинації.

¹⁶ Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Стратегії розвитку імунопрофілактики та захисту населення від вакцинотворених інфекцій до 2030 року» : від 30.11.2022 № 1169-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1169-2022-%D1%80#Text>

¹⁷ World Health Organization. Immunization in emergencies. URL: <https://www.who.int/teams/immunization-vaccines-and-biologicals/emergencies>

¹⁸ Закон України «Про систему громадського здоров'я» : від 06.09.2022 № 2573-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#Text>

¹⁹ Закон України «Про захист населення від інфекційних хвороб» : від 06.04.2000 № 1645-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1645-14#Text>

²⁰ World Health Organization. Global vaccine action plan 2011–2020. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/global-vaccine-action-plan-2011-2020>

3. Водночас виявлено окремі прогалини у знаннях щодо класифікації несприятливих подій після імунізації та програмних помилок імунізації, що підтверджує необхідність подальшого безперервного професійного навчання медичних працівників.

4. Встановлено, що основними бар'єрами до вакцинації серед медичних працівників залишаються страх побічних реакцій, недовіра до вакцин та безпекова ситуація у регіоні, що в умовах війни може негативно впливати на рівень прихильності до профілактичних щеплень.

5. Результати дослідження підтверджують ключову роль медичних працівників у формуванні довіри населення до вакцинації, протидії дезінформації та підтриманні епідемічної стійкості населення в умовах воєнного стану.

6. В умовах повномасштабної війни підготовка медичних працівників з питань імунопрофілактики повинна розглядатися як важливий компонент системи біобезпеки та біозахисту держави, оскільки забезпечення стабільного функціонування системи вакцинації безпосередньо впливає на профілактику спалахів вакцинокерованих інфекцій, збереження громадського здоров'я та національну безпеку України.

7. Перспективним напрямом залишається подальший розвиток системи безперервного професійного навчання медичних працівників щодо безпеки вакцинації, моніторингу НППІ, кризових комунікацій та організації імунізації населення в умовах надзвичайних ситуацій і воєнного стану.

РОЗДІЛ 3. БЕЗПЕКА, УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ТА РІШЕННЯ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

CHAPTER 3. SAFETY, RISK MANAGEMENT, AND EMERGENCY RESPONSE

ARTIFICIAL INTELLIGENCE SUPPORTED FIELD RECOGNITION OF BIOLOGICAL, CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL THREATS IN WARTIME

ВИЯВЛЕННЯ БІОЛОГІЧНИХ, ХІМІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ЗАГРОЗ У БОЙОВИХ УМОВАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Karol Jędrasiak, Ph.D. Eng., Deputy Director of Technology Transfer Center WSB University, Poland, kjedrasiak@wsb.edu.pl, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2254-1030>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.20>

Abstract. Wartime biological, chemical and environmental threats increasingly arise from damaged industrial infrastructure, disrupted public-health systems, contaminated water networks, fires, hazardous transport corridors and ambiguous hostile actions. Predictive prevention is defined here as the ability to identify probable escalation pathways from incomplete and time-sensitive signals before full incident confirmation is available. This article develops an operational model for uniformed services and civil-protection actors that combines multi-source data, provenance control, anomaly detection, unmanned stand-off reconnaissance, dynamic geospatial risk mapping, artificial intelligence (AI) staff-support modules and exercise-based validation. The model does not transfer decisions to AI. It uses AI to rank information gaps, expose uncertainty, structure reports and support safer reconnaissance, while legally responsible human command remains accountable for warning, sampling, isolation, evacuation and stand-down decisions. The practical value of the framework is earlier recognition of weak signals, reduced responder exposure, better prioritization of sampling and more auditable command reasoning during wartime emergencies.

Keywords: wartime threat prevention, biological threats, chemical threats, environmental threats, artificial intelligence, unmanned systems, geospatial intelligence, dynamic risk mapping, chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) defence, command decision support.

Анотація. У воєнний час біологічні, хімічні та екологічні загрози дедалі частіше виникають внаслідок пошкодження промислової інфраструктури, порушення роботи систем охорони здоров'я, забруднення водопровідних мереж, пожеж, використання небезпечних транспортних коридорів та неоднозначних ворожих дій. Прогнозна профілактика визначається тут як здатність ідентифікувати ймовірні шляхи ескалації на основі неповних та термінових сигналів до того, як буде отримано повне підтвердження інциденту. У цій статті розроблено оперативну модель для служб у формі та суб'єктів цивільного захисту, яка поєднує дані з різних джерел, контроль походження, виявлення аномалій, безпілотну розвідку на відстані, динамічне геопросторове картування ризиків, модулі підтримки персоналу на основі штучного інтелекту (ШІ) та валідацію на основі навчань. Модель не передає прийняття рішень ШІ. Вона використовує ШІ для ранжування інформаційних прогалин,

виявлення невизначеності, структурування звітів та забезпечення безпечнішої розвідки, тоді як юридично відповідальне людське командування залишається відповідальним за рішення щодо попередження, відбору проб, ізоляції, евакуації та припинення дій. Практична цінність цієї структури полягає у більш ранньому розпізнаванні слабких сигналів, зменшенні ризику для реагуючих служб, кращому визначенні пріоритетів відбору проб та більш контрольованому обґрунтуванні рішень командування під час надзвичайних ситуацій у воєнний час.

Ключові слова: запобігання загрозам у воєнний час, біологічні загрози, хімічні загрози, екологічні загрози, штучний інтелект, безпілотні системи, геопросторова розвідка, динамічне картографування ризиків, хімічна, біологічна, радіологічна та ядерна (ХБРЯ) оборона, підтримка прийняття рішень командуванням.

INTRODUCTION

Biological, chemical and environmental emergencies in wartime do not usually begin as cleanly observable events. They begin as partial, noisy and spatially dispersed signals: an odour report, a smoke column, a sudden change in water quality, a rise in non-specific symptoms, a damaged storage tank visible in imagery, a meteorological change that redirects a plume, or a cluster of contradictory field reports. Traditional chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) preparedness is therefore necessary but not sufficient. North Atlantic Treaty Organization (NATO) doctrine on CBRN defence¹ and NATO CBRN defence policy² preserve warning, reporting, protection, reconnaissance, decontamination, medical response and restoration of operational control as core functions, while World Health Organization guidance on biological and chemical weapons³ frames public-health response, risk communication and medical preparedness as essential response domains. These functions must be complemented by earlier risk anticipation and information prioritization in situations where delayed recognition can increase casualties and environmental damage.

The wartime context makes this shift especially important. Industrial plants, water intakes, fuel depots, laboratories, energy infrastructure, waste-storage sites and transport routes can become secondary hazard sources when damaged by attack, sabotage, fire or infrastructure collapse. In Ukraine, peer-reviewed analysis of environmental health impacts⁴, the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) assessment⁵, the Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE) platform report⁶, Rawtani et al.'s environmental-damage perspective⁷ and the United Nations Environment Programme (UNEP) preliminary review⁸ have documented broad environmental and public-health consequences of

¹ North Atlantic Treaty Organization. (2010). ATP-3.8.1 Volume I: CBRN defence on operations. <https://nllp.jallc.nato.int/cmmt/ciedcoi/CIED%20PUBLICATIONS/STANAGs/STANAG%202521%20CBRN%20Defence%20Operations%20ATP%203.8.1%20vol.%20I.pdf>

² North Atlantic Treaty Organization. (2022). NATO's chemical, biological, radiological and nuclear defence policy. https://www.nato.int/cps/cn/natohq/official_texts_197768.htm

³ World Health Organization. (2004). Public health response to biological and chemical weapons: WHO guidance. <https://www.who.int/publications-detail-redirect/public-health-response-to-biological-and-chemical-weapons-who-guidance-%282004%29>

⁴ Hryhorczuk, D., Levy, B. S., Prodanchuk, M., Kravchuk, O., Bubalo, N., Hryhorczuk, A., & Erickson, T. B. (2024). The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 19(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>

⁵ Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). Environmental impacts of the war in Ukraine and prospects for a green reconstruction. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9e86d691-en>

⁶ Organization for Security and Co-operation in Europe. (2022). OSCE-supported platform highlights environmental risks stemming from war in Ukraine. <https://www.osce.org/project-coordinator-in-ukraine-closed/520442>

⁷ Rawtani, D., Gupta, G., Khatri, N., Rao, P. K., & Hussain, C. M. (2022). Environmental damages due to war in Ukraine: A perspective. *Science of the Total Environment*, 850, 157932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932>

⁸ United Nations Environment Programme. (2022). The environmental impact of the conflict in Ukraine: A preliminary review. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/40746>

war, including risks related to industrial contamination, damaged infrastructure, water pollution, hazardous waste and long-term ecological harm. These examples demonstrate that wartime threat prevention cannot be reduced to one agency, one dataset or one sensor. It requires an interdisciplinary operating model linking emergency management, epidemiology, environmental monitoring, geospatial analysis, robotics, command procedures and legal accountability.

This article argues that predictive prevention should be treated as a command-support capability rather than as a technological slogan. Its aim is to identify probable escalation pathways before an incident becomes operationally irreversible. The proposed framework does not replace field reconnaissance, laboratory confirmation, medical judgement, public-health authority or command responsibility. Instead, it gives uniformed services and civil-protection actors a disciplined way to integrate weak signals, uncertainty and operational constraints into earlier and more auditable decisions.

The original contribution of this article is an operational model that translates predictive prevention into a practical command-support architecture for wartime biological, chemical and environmental threat management. The model is composed of seven elements: multi-source operational data, quality and provenance control, anomaly and pattern detection, unmanned stand-off reconnaissance, dynamic geospatial risk mapping, human-in-the-loop AI staff support and exercise-based validation. The model is intended for uniformed services, civil-protection institutions, public-health authorities, environmental agencies and critical-infrastructure operators that must act before uncertainty is fully resolved.

REVIEW METHODOLOGY AND SOURCE SELECTION

A structured narrative review with transparent source documentation was conducted on May, 2026. The review should not be interpreted as a systematic review or meta-analysis. It was designed as a transparent evidence-consolidation process because the evidence base includes heterogeneous doctrine, standards, official reports, environmental assessments, robotics studies, public-health surveillance studies, geospatial methods and AI governance documents. The objective was to synthesize operationally relevant evidence and convert it into a framework for wartime prevention, early warning, reconnaissance prioritization and staff decision support.

Searches covered scientific metadata sources and targeted institutional repositories. Query groups addressed CBRN defence, including systematic review evidence on chemical, biological, radiological and nuclear threat management⁹, biological early warning, chemical sensing, environmental monitoring, atmospheric dispersion, geospatial risk mapping, unmanned systems, data fusion, disaster-response situation awareness, public-health intelligence, artificial intelligence (AI) decision support and environmental impacts of the war in Ukraine. The governance search also included the European Union Artificial Intelligence Act (AI Act)¹⁰, the National Institute of Standards and Technology (NIST) Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF)¹¹ and NATO's revised artificial intelligence strategy¹². Sources were eligible when they supported at least one of four claim categories: operational doctrine and governance, data and modelling methods, unmanned or remote reconnaissance, or implementation and validation safeguards.

⁹ Gawlik-Kobylińska, M. (2022). Current issues in combating chemical, biological, radiological, and nuclear threats to empower sustainability: A systematic review. *Applied Sciences*, 12(16), 8315. <https://doi.org/10.3390/app12168315>

¹⁰ European Parliament and Council of the European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1689 laying down harmonised rules on artificial intelligence. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj>

¹¹ National Institute of Standards and Technology. (2023). Artificial intelligence risk management framework (AI RMF 1.0) (NIST AI 100-1). <https://doi.org/10.6028/NIST.AI.100-1>

¹² North Atlantic Treaty Organization. (2024). Summary of NATO's revised artificial intelligence strategy. https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_227237.htm

Sources were excluded when they were unrelated to biological, chemical or environmental threats, lacked operational relevance, contained unsupported claims, duplicated other records or could not be connected to the practical objective of predictive prevention.

The screening process identified 379 records. After removal of 35 duplicates, 344 distinct sources were screened. 137 records underwent full-source qualification and claim mapping. 56 sources were retained and cited in the final synthesis. Source qualification was conducted as authorial expert screening based on relevance to wartime or degraded operations, methodological transparency, institutional authority, operational usefulness and direct applicability to biological, chemical, environmental, geospatial, unmanned or AI-supported prevention. No pooled effect size, formal meta-analysis or independent dual-review adjudication is claimed. The retained sources include official documents from NATO, the World Health Organization, the International Atomic Energy Agency, the International Organization for Standardization, the United Nations, the OECD, the Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons and the European Union, systematic or scoping reviews, empirical studies on unmanned and remote sensing, and methodological papers on anomaly detection, data fusion, geospatial analysis and disaster decision support.

Table 1

Source inclusion and exclusion criteria used during structured source qualification.

Criterion area	Inclusion rule	Exclusion rule	Purpose
Threat relevance	Sources addressing biological, chemical, environmental or CBRN-related hazards under emergency, conflict or critical-infrastructure conditions.	Sources limited to ordinary industrial safety, generic disaster management or unrelated cyber/physical security without a threat-prevention component.	Keep the synthesis aligned with the BCET 2026 scope and wartime hazard-prevention objective.
Operational usefulness	Doctrine, standards, official reports, field-oriented studies and methods that could inform warning, reconnaissance, sampling, mapping or command support.	Purely theoretical, promotional or speculative sources without operational decision relevance.	Prioritize evidence that can be translated into procedures for uniformed services and civil protection.
Methodological transparency	Sources with identifiable methods, data sources, institutional authority or documented technical assumptions.	Sources with unsupported implementation claims, unclear provenance or unverifiable technical assertions.	Reduce the risk of adopting unvalidated AI, sensing or mapping claims.
Wartime or degraded-context relevance	Sources directly related to conflict effects, degraded infrastructure, emergency surveillance, damaged environments or stand-off reconnaissance.	Sources assuming ideal communications, complete data, stable infrastructure or routine public-health conditions only.	Ensure that the framework remains realistic under missing, delayed and misleading data.
Governance and accountability	Sources supporting human responsibility, auditability, risk management, evidence handling, chain of custody or legal constraints.	Sources implying autonomous high-consequence decision-making without verification and accountability controls.	Preserve the distinction between AI support and legally responsible command decisions.

The principal limitation of this review is that it integrates heterogeneous evidence rather than comparable experimental studies. It therefore does not claim pooled effectiveness of any AI, unmanned or geospatial method. Its purpose is to define a defensible operational architecture, identify practical validation metrics and specify safeguards that should be tested during exercises before deployment in real incidents.

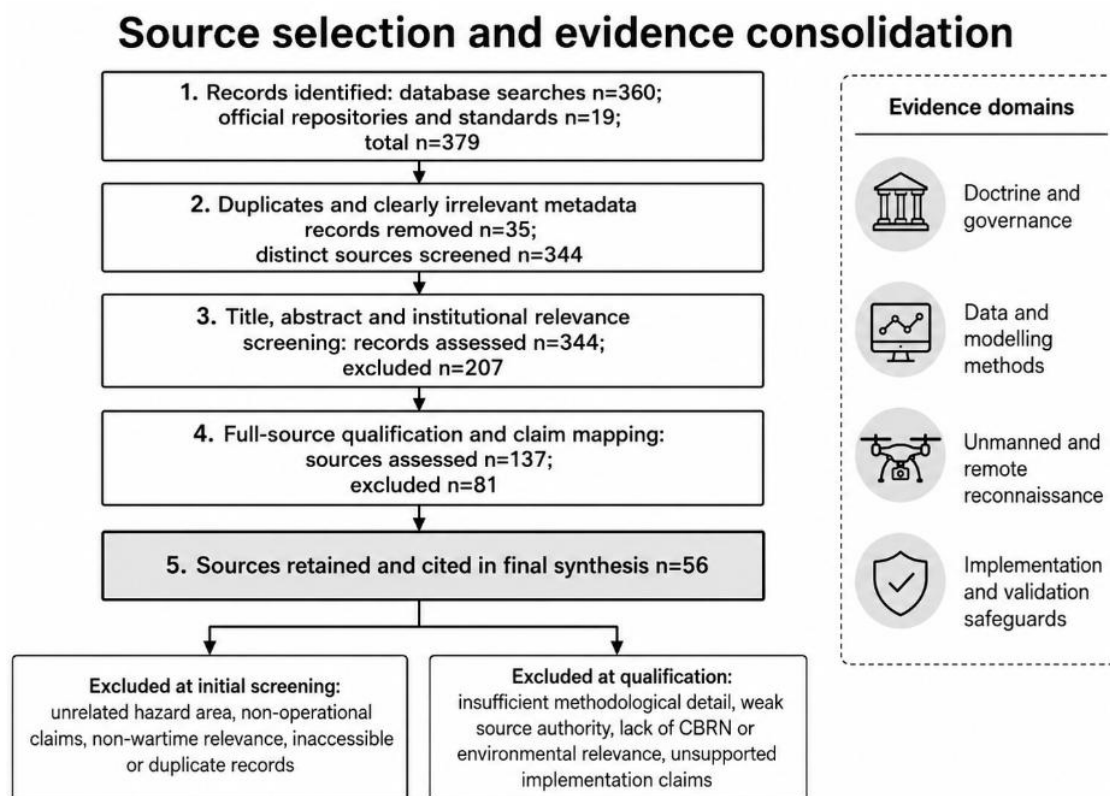


Figure 1. Structured source selection and evidence consolidation process used for the review.

FROM RESPONSE DOCTRINE TO PREDICTIVE PREVENTION

The shift toward predictive prevention should be understood as an extension of doctrine, not as a substitute for it. NATO CBRN doctrine and policy^{13,14} define capabilities for detection, identification, monitoring, warning, reporting, protection, hazard management, medical countermeasures and recovery. World Health Organization (WHO) guidance on biological and chemical weapons¹⁵ similarly emphasizes public-health response, risk communication, medical preparedness and coordinated management of biological and chemical events. These functions remain the backbone of crisis response. Predictive prevention adds an earlier analytical layer that asks where reconnaissance, sampling and command attention should be directed before the hazard is fully confirmed.

This temporal shift is consistent with disaster-risk reduction thinking. The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction¹⁶ emphasizes understanding risk, strengthening governance, investing in risk reduction and improving preparedness before disaster consequences accumulate. In CBRN and environmental threat contexts, the analogous task is to transform hazard registers, sensor streams, weather

¹³ Ibid 1

¹⁴ Ibid 2

¹⁵ Ibid 3

¹⁶ United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>

data, public-health signals, geospatial layers and field reports into anticipatory decisions. Such decisions may include dispatching unmanned aerial vehicle (UAV) reconnaissance before a team enters a site, sampling a water intake before contamination reaches a population centre, pre-positioning protective equipment, warning hospitals about possible exposure or rejecting a false alarm when evidence remains weak.

The operational logic is probabilistic. A chemical release is shaped by wind, atmospheric stability, terrain, drainage, buildings and source characteristics. A biological signal is shaped by incubation periods, population movement, disrupted healthcare access and reporting bias. Environmental degradation depends on hydrology, soil, fire, damaged treatment systems, industrial inventories and delayed measurement. In each case, the operational question is not whether AI can predict the future with certainty. The question is whether a system can reduce uncertainty early enough to improve reconnaissance tasking, responder safety and public-protection decisions.

Prediction, early warning and decision support should therefore be kept analytically distinct. Prediction estimates probable threat development under stated assumptions. Early warning detects signals that justify verification before full confirmation exists. Decision support structures evidence, uncertainty and operational options for human command. A mature predictive-prevention capability connects these three functions without presenting any of them as autonomous decision-making.

WARTIME THREAT ENVIRONMENT AND OPERATIONAL CONSTRAINTS

Wartime environments differ from ordinary hazardous-materials incidents because the hazard source, the information environment and the response system may all be degraded at the same time. A damaged facility may release chemicals while local sensors are destroyed. Water contamination may spread while laboratories are overloaded or inaccessible. Epidemiological signals may be confounded by displacement, disrupted care-seeking behaviour, sheltering conditions and interruptions in vaccination, sanitation or routine surveillance. Field teams may face shelling, mines, damaged roads, contaminated debris, communications outages and electromagnetic interference.

The most consequential operational constraints are missing data, wrong data and delayed data. Sensor drift can produce false trends. Location data may be imprecise. Reports from residents may be duplicated across social channels. Adversarial actors may amplify rumours or mask real releases, which is consistent with the need for intelligent-adversary risk analysis in bioterrorism and deliberate threat management¹⁷. Global Positioning System (GPS) interference can degrade the quality of unmanned reconnaissance. Weather forecasts may be insufficient for street-level plume prediction. These constraints do not make predictive prevention impossible, but they require explicit confidence levels, provenance tracking and human verification before operational escalation.

For uniformed services, the practical implication is that a predictive system must support degraded operations rather than assume ideal data conditions. It must be able to mark uncertain coordinates, separate confirmed measurements from unverified reports, retain the history of assumptions, and show which decisions are robust to missing data. The system should also identify when the evidence is too weak for a high-consequence action and when additional reconnaissance is safer than immediate commitment of personnel.

¹⁷ Parnell, G. S., Smith, C. M., & Moxley, F. I. (2010). Intelligent adversary risk analysis: A bioterrorism risk management model. *Risk Analysis*, 30(1), 32-48. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01319.x>

DATA SOURCES AND QUALITY CONTROLS

Data are a source of operational advantage only when they are interpreted through their uncertainty. Reviews of disaster-response technologies show that information systems contribute most when they improve shared situational awareness and convert observations into usable decisions across agencies¹⁸. In CBRN and environmental prevention, relevant data include fixed sensors, mobile detectors, meteorology, hydrology, facility inventories, satellite and UAV imagery, public-health alerts, clinical syndromic indicators, laboratory results, field reports, crowdsourced observations and geospatial layers. Data fusion literature provides the methodological basis for integrating such streams^{19,20}, but also shows that fusion without provenance control can amplify errors.

Environmental sensor networks, UAVs and crowdsensing can increase observation density in areas where conventional monitoring is sparse or disrupted. Reviews of wireless sensor networks, UAVs and citizen-sensing approaches show potential for air, water and environmental surveillance^{21, 22, 23}, provided that calibration, coverage, communication quality and interpretation limits are addressed. Remote sensing can support water-quality and environmental monitoring^{24,25}, although optical retrieval is affected by cloud cover, turbidity, atmospheric correction, spatial resolution and the need for field validation. Meteorological and precipitation products such as Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS)²⁶ can complement local observations when extreme rainfall or runoff affects contamination transport.

Public-health data must be handled with particular caution. Syndromic surveillance, event-based surveillance and epidemic intelligence can detect unusual patterns, but they do not prove intentional release or identify the agent without follow-up investigation. WHO guidance on Early Warning, Alert and Response systems²⁷ and the WHO Epidemic Intelligence from Open Sources strategy²⁸ emphasize structured alerting, verification and response coordination, not automatic attribution. The Centers for Disease Control and Prevention (CDC) BioSense Platform²⁹ illustrates the operational value of platform-based syndromic data, but such systems require context, baseline understanding and protection against overinterpretation.

¹⁸ Kedia, T., Ratcliff, J., O'Connor, M., Oluic, S. H., & Rose, M. A. (2022). Technologies enabling situational awareness during disaster response: A systematic review. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 16(1), 341-359. <https://doi.org/10.1017/dmp.2020.196>

¹⁹ Castanedo, F. (2013). A review of data fusion techniques. *The Scientific World Journal*, 2013, 704504. <https://doi.org/10.1155/2013/704504>

²⁰ Hall, D., & Llinas, J. (1997). An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 85(1), 6-23. <https://doi.org/10.1109/5.554205>

²¹ Fascista, A. (2022). Toward integrated large-scale environmental monitoring using WSN/UAV/crowdsensing: A review of applications, signal processing, and future perspectives. *Sensors*, 22(5), 1824. <https://doi.org/10.3390/s22051824>

²² Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211-221. <https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y>

²³ Kamel Boulos, M. N., Resch, B., Crowley, D. N., Breslin, J. G., Sohn, G., Burtner, R., Pike, W. A., Jezierski, E., & Chuang, K. Y. (2011). Crowdsourcing, citizen sensing and sensor web technologies for public and environmental health surveillance and crisis management: Trends, OGC standards and application examples. *International Journal of Health Geographics*, 10, 67. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-10-67>

²⁴ Gholizadeh, M., Melesse, A., & Reddi, L. (2016). A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*, 16(8), 1298. <https://doi.org/10.3390/s16081298>

²⁵ Yang, H., Kong, J., Hu, H., Du, Y., Gao, M., & Chen, F. (2022). A review of remote sensing for water quality retrieval: Progress and challenges. *Remote Sensing*, 14(8), 1770. <https://doi.org/10.3390/rs14081770>

²⁶ Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations: A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

²⁷ World Health Organization. (2022). Early warning, alert and response in emergencies: An operational guide. <https://iris.who.int/handle/10665/365730>

²⁸ World Health Organization. (2024). Epidemic intelligence from open sources strategy 2024-2026. <https://iris.who.int/handle/10665/382406>

²⁹ Centers for Disease Control and Prevention. (2026). BioSense Platform. <https://www.cdc.gov/nssp/php/about/about-nssp-and-the-biosense-platform.html>

Table 2

Operational data sources for predictive prevention of wartime biological, chemical and environmental threats.

Data source	Operational contribution	Typical uncertainty	Preventive use
Environmental sensors	Air, water, radiation or volatile organic compound measurements.	Calibration drift, weather exposure, power loss, false positives.	Trigger confirmatory sampling and define reconnaissance corridors.
Meteorology and hydrology	Wind, precipitation, temperature, atmospheric stability, drainage and flow direction.	Local variability, forecast error, missing micro-scale data.	Forecast plume movement, runoff and downstream contamination risk.
Satellite and UAV imagery	Optical, thermal and structural indicators across inaccessible or dangerous areas.	Cloud cover, revisit time, visual ambiguity, sensor limits.	Prioritize sites, identify fires, damaged containment and water-colour changes.
Health and syndromic data	Early indication of abnormal clinical patterns or exposure-related symptoms.	Reporting delay, displacement, care access changes, non-specific symptoms.	Prompt epidemiological investigation and environmental verification.
Field and civilian reports	Local observations, odours, smoke, dead animals, unusual water or access problems.	Duplication, misinformation, inaccurate geocoding, panic effects.	Support triage and identify locations for verification.
Facility and infrastructure registers	Hazard inventories, water intakes, hospitals, depots, transport routes and storage sites.	Outdated records, damaged assets, incomplete ownership data.	Estimate source terms and prioritize assets requiring protection.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FUNCTIONS AND VALIDATION METRICS

Artificial intelligence (AI) should be described by function rather than by a general label. In predictive prevention, the most relevant functions are anomaly detection, classification, sensor fusion, time-series forecasting, geospatial risk ranking, natural language processing, information-gap detection and decision triage. Anomaly-detection literature provides methods for identifying deviations in multivariate streams^{30, 31, 32}, but also shows that algorithm choice, baseline definition and local context strongly affect false alarms. Therefore, AI outputs should be used to prioritize verification, not to declare a confirmed hazardous event.

The practical output of AI in this field is rarely a single prediction. A more useful output is a ranked set of areas, hypotheses and missing information. Examples include: verify possible chlorine release near a damaged industrial zone, sample downstream water intake within two hours, check whether odour reports align with wind direction, task UAV imagery over the suspected storage area, or request medical review of an unusual cluster of respiratory symptoms. A CBRN-specific machine-learning decision-support

³⁰ Centers for Disease Control and Prevention. (2026). BioSense Platform. <https://www.cdc.gov/nssp/php/about/about-nssp-and-the-biosense-platform.html>

³¹ Goldstein, M., & Uchida, S. (2016). A comparative evaluation of unsupervised anomaly detection algorithms for multivariate data. *PLOS ONE*, 11(4), e0152173. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152173>

³² Zhang, C., Song, D., Chen, Y., Feng, X., Lumezanu, C., Cheng, W., Ni, J., Zong, B., Chen, H., & Chawla, N. V. (2019). A deep neural network for unsupervised anomaly detection and diagnosis in multivariate time series data. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 33(1), 1409-1416. <https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.33011409>

framework³³ illustrates how protective decisions can be structured, but field deployment still depends on data quality, operational validation and human review.

Validation must be operational, not only statistical. Useful metrics include time from first signal to alert, time from alert to reconnaissance tasking, false-alarm rate, missed-event rate, spatial agreement between predicted and measured hazard zones, ranking accuracy of sampling locations, reduction in responder exposure, completeness of audit trail, robustness to missing data and operator acceptance during exercises. These measures are more relevant for uniformed services than abstract model accuracy alone because the cost of an error depends on whether people are sent into danger, warned too late or warned unnecessarily.

Table 3

AI functions, outputs, failure modes and validation controls.

AI function	Input examples	Operational output	Validation and control requirement
Anomaly detection	Sensor time series, emergency department (ED) syndromes, water-quality indices.	Deviation alerts and baseline breaks.	Local baselines, false-alarm review, recalibration after exercises.
Classification	Spectral imagery, sensor signatures, report text.	Probable hazard class or incident type.	Training-data documentation and expert validation.
Forecasting	Meteorology, hydrology, dispersion outputs, case reports.	Likely spread direction and time window.	Uncertainty intervals, model comparison and conservative assumptions.
Natural language processing	Field logs, social reports, open-source alerts, medical notes.	Extracted entities, locations, dates and contradictions.	Source verification, deduplication and protection against hallucinated content.
Geospatial risk ranking	Hazard, exposure, vulnerability and accessibility layers.	Prioritized reconnaissance or sampling zones.	Comparison with field results and sensitivity to missing layers.
Information-gap detection	Incomplete maps, missing source terms, sparse sensors.	Questions for staff and tasking recommendations.	Human review of necessity, feasibility and safety.

The operational consequence of model error must be assessed before deployment. A false positive can divert teams, generate unnecessary warnings and weaken trust. A false negative can delay sampling, expose responders and leave affected populations without protection. For this reason, each AI output should be paired with a failure mode, verification action and responsible human reviewer before it enters the operational briefing.

BIOLOGICAL EARLY WARNING UNDER CONFLICT CONDITIONS

The biological component requires particular analytical discipline because early signals are rarely specific. Fever, diarrhoea, respiratory symptoms or unusual absenteeism can reflect natural outbreaks, displacement, poor sanitation, interrupted healthcare access, seasonal variation, psychological stress or

³³ Kegyes, T., Süle, Z., & Abonyi, J. (2024). Machine learning-based decision support framework for CBRN protection. *Heliyon*, 10(4), e25946. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25946>

deliberate biological release. AI-based epidemic and pandemic early-warning reviews^{34, 35} and infectious-disease natural language processing reviews³⁶ show potential for earlier recognition of abnormal patterns, but they consistently require careful validation, clinical context and response integration.

In conflict settings, biological surveillance should therefore be framed as a hypothesis-generation tool. Big-data infectious-disease surveillance³⁷, automated hospital outbreak detection³⁸ and early-warning system evidence³⁹ indicate that abnormal patterns deserve investigation, but the operational response must still involve epidemiological assessment, laboratory confirmation when possible, environmental review and comparison with population movement and healthcare-access data. The correct decision may be to increase surveillance, sample water, inspect sanitation infrastructure, warn medical facilities or reject an alert as a data artefact.

A practical biological early-warning module should combine syndromic baselines, event-based reports, healthcare-capacity information, displacement data, weather, water-system status and local expert review. For example, a sudden increase in gastrointestinal symptoms after damage to a water-treatment facility should not be classified automatically as intentional biological activity. The system should compare the signal with water-quality anomalies, repair logs, population displacement, rainfall, damaged sewage infrastructure, downstream hydrology and laboratory sampling capacity. Only after environmental verification, epidemiological review and laboratory confirmation should the hypothesis be escalated from public-health anomaly to confirmed biological or waterborne emergency. Laboratory confirmation should be treated as the diagnostic anchor whenever it is available, while AI and syndromic surveillance should only determine where verification is most urgent. This distinction is crucial in wartime because disrupted sanitation, displacement and interrupted healthcare access can mimic deliberate or unusual biological events.

CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL THREAT DETECTION

Chemical and environmental threats are often more spatially immediate than biological threats, but they are not necessarily easier to interpret. Gas plumes are turbulent and intermittent. Water contamination can be delayed by hydrological transport. Fires can change source terms and produce secondary toxic releases. Damaged containment systems can release mixtures rather than single agents. Chemical-detection research using mobile platforms and AI-based data processing⁴⁰ shows increasing potential, but it also emphasizes sensor specificity, calibration, plume structure and the difficulty of reliable source localization.

Atmospheric dispersion models remain central to chemical and radiological risk anticipation. The Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry (WRF-Chem)⁴¹, fast urban dispersion

³⁴ El Morr, C., Ozdemir, D., Asdaah, Y., Saab, A., El-Lahib, Y., & Sokhn, E. S. (2024). AI-based epidemic and pandemic early warning systems: A systematic scoping review. *Health Informatics Journal*, 30(3), 14604582241275844. <https://doi.org/10.1177/14604582241275844>

³⁵ MacIntyre, C. R., Chen, X., Kunasekaran, M., Quigley, A., Lim, S., Stone, H., Paik, H. Y., Yao, L., Heslop, D., Wei, W., Sarmiento, I., & Gurdasani, D. (2023). Artificial intelligence in public health: The potential of epidemic early warning systems. *Journal of International Medical Research*, 51(3), 03000605231159335. <https://doi.org/10.1177/03000605231159335>

³⁶ Omar, M., Brin, D., Glicksberg, B., & Klang, E. (2024). Utilizing natural language processing and large language models in the diagnosis and prediction of infectious diseases: A systematic review. *American Journal of Infection Control*, 52(9), 992-1001. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2024.03.016>

³⁷ Hay, S. I., George, D. B., Moyes, C. L., & Brownstein, J. S. (2013). Big data opportunities for global infectious disease surveillance. *PLoS Medicine*, 10(4), e1001413. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001413>

³⁸ Leclère, B., Buckeridge, D. L., Boëlle, P. Y., Astagneau, P., & Lepelletier, D. (2017). Automated detection of hospital outbreaks: A systematic review of methods. *PLOS ONE*, 12(4), e0176438. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176438>

³⁹ Meckawy, R., Stuckler, D., Mehta, A., Al-Ahdal, T. M., & Doebbeling, B. N. (2022). Effectiveness of early warning systems in the detection of infectious diseases outbreaks: A systematic review. *BMC Public Health*, 22, 2216. <https://doi.org/10.1186/s12889-022-14625-4>

⁴⁰ Noh, D., & Oh, E. (2025). Chemical detection using mobile platforms and AI-based data processing technologies. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 14(1), 6. <https://doi.org/10.3390/jsan14010006>

⁴¹ Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. (2005). Fully coupled online chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39(37), 6957-6975. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>

model evaluation⁴², general atmospheric dispersion modelling reviews⁴³, the Flexible Particle (FLEXPART) Lagrangian particle dispersion model⁴⁴ and the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) system⁴⁵ demonstrate different trade-offs among data requirements, computational cost, spatial detail and operational speed. In wartime, the strongest use of such models is not precise prediction of a plume edge. It is conservative prioritization of corridors where reconnaissance, warning and protective action should be considered first.

Environmental degradation must be incorporated into the same prevention logic. Contamination of water, soil and air can result from destroyed industrial facilities, fires, wastewater-system failure, fuel spills, damaged waste sites and disrupted environmental governance. The OECD assessment⁴⁶, Rawtani et al.'s environmental-damage perspective⁴⁷ and the UNEP preliminary review⁴⁸ show that environmental damage during the war in Ukraine can be distributed across industrial, agricultural, hydrological and urban systems rather than confined to a single incident site. These effects may persist after visible hostilities or fires have ended, producing delayed exposure through drinking water, contaminated sediment, agricultural soil, dust resuspension and food-chain pathways. A prevention model must therefore treat environmental consequences as both immediate operational hazards and long-term public-health risks requiring repeated monitoring. Post-incident monitoring plans should define sampling intervals, responsible laboratories, reporting channels and criteria for terminating surveillance.

Operational escalation should be defined before the incident occurs. These thresholds should be written into standard operating procedures before an incident, because improvised thresholds during a crisis increase the risk of both responder exposure and unnecessary public disruption. A weak or unverified signal should trigger observation and data-quality checks. A signal consistent with facility inventories, weather or hydrological pathways should trigger an alert and conservative modelling. A signal supported by imagery, sensor readings or repeated independent reports should trigger stand-off reconnaissance and targeted sampling. A signal confirmed by field measurements, laboratory evidence or clinically consistent exposure reports should trigger public warning, zone isolation, specialist entry protocols and formal command decisions. A signal contradicted by verified measurements should trigger stand-down, but the audit trail should remain available for after-action review. This threshold sequence helps services avoid both premature exposure of response teams and delayed protection of the public.

⁴² Hertwig, D., Soulhac, L., Fuka, V., Auerswald, T., Carpentieri, M., Hayden, P., Robins, A., Xie, Z. T., & Coceal, O. (2018). Evaluation of fast atmospheric dispersion models in a regular street network. *Environmental Fluid Mechanics*, 18(4), 1007-1044. <https://doi.org/10.1007/s10652-018-9587-7>

⁴³ Leelőssy, A., Molnár, F., Izsák, F., Havasi, Á., Lagzi, I., & Mészáros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: A review. *Open Geosciences*, 6(3). <https://doi.org/10.2478/s13533-012-0188-6>

⁴⁴ Pisso, I., Sollum, E., Grythe, H., Kristiansen, N. I., Cassiani, M., Eckhardt, S., Arnold, D., Morton, D., Thompson, R. L., Groot Zwaafink, C. D., Evangeliou, N., Sodemann, H., Haimberger, L., Henne, S., Brunner, D., Burkhardt, J. F., Fouilloux, A., Brioude, J., Philipp, A., ... Stohl, A. (2019). The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 10.4. *Geoscientific Model Development*, 12(12), 4955-4997. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4955-2019>

⁴⁵ Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>

⁴⁶ Ibid 5

⁴⁷ Ibid 7

⁴⁸ Ibid 8

UNMANNED SYSTEMS AND STAND-OFF RECONNAISSANCE

Unmanned systems are operationally important because they can collect evidence in hazardous or uncertain areas while limiting responder exposure. Radiation and radiological mapping studies^{49, 50} show that UAVs can support aerial monitoring, dose-rate mapping and reconnaissance when flight altitude, detector sensitivity, shielding and background correction are properly considered. International Atomic Energy Agency (IAEA) technical outputs on uncrewed aerial systems and radioactive-material detection^{51, 52} provide complementary institutional guidance for radiation detection and surveillance. Radiological drone scouting and inspection research⁵³ further demonstrates the role of aerial platforms in hazardous-site reconnaissance. Broader ionizing-radiation monitoring technologies⁵⁴ also demonstrate the relevance of networked sensing, although field reliability remains a central concern.

Chemical sensing by small UAVs is more difficult than visual reconnaissance because gas plumes are unstable and concentration fields are sparse. Experimental work on nano aerial vehicles⁵⁵ and volatile organic compound (VOC) detection⁵⁶ demonstrates feasibility for selected scenarios, but sensor response, payload, battery endurance and contamination control limit generalization. Unmanned ground vehicles (UGVs) complement UAVs when airspace is unsafe, indoor reconnaissance is needed, weather limits flight or heavier payloads are required. Reviews of gas source localization and mapping with mobile robots⁵⁷ show progress, but also confirm that chemical search remains sensitive to airflow, source intermittency and platform constraints.

The core preventive value of unmanned reconnaissance is not simply collecting more data. It is collecting the next most informative data point at lower risk. A predictive system should therefore task UAVs and UGVs according to the uncertainty map: verify a suspected source, cross a predicted plume corridor, inspect a water body, observe fire spread, check access routes or confirm that a suspected hazard zone is actually negative. This tasking logic is more valuable than random surveying because it links platform deployment to decision needs.

Table 4

Operational roles of unmanned systems in predictive prevention.

Role	Platform	Main value	Operational limitation
Stand-off visual reconnaissance	UAV	Rapid overview of damaged facilities, fires, access routes and water bodies.	Weather, airspace control, battery endurance and visual ambiguity.

⁴⁹ Chierici, A., Malizia, A., Di Giovanni, D., Ciolini, R., & d'Errico, F. (2022). A high-performance gamma spectrometer for unmanned systems based on off-the-shelf components. *Sensors*, 22(3), 1078. <https://doi.org/10.3390/s22031078>

⁵⁰ Connor, D., Martin, P. G., & Scott, T. B. (2016). Airborne radiation mapping: Overview and application of current and future aerial systems. *International Journal of Remote Sensing*, 37(24), 5953-5987. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1252474>

⁵¹ International Atomic Energy Agency. (2022). Use of uncrewed aerial systems for radiation detection and surveillance: Technical output from the technical meeting. https://nucleus.iaea.org/sites/nuclear-instrumentation/Documents/TC_UAS_Rad_Surv_final.pdf

⁵² International Atomic Energy Agency. (2024). Detection in a State's interior of nuclear and other radioactive material out of regulatory control. <https://www.iaea.org/publications/15582/detection-in-a-states-interior-of-nuclear-and-other-radioactive-material-out-of-regulatory-control>

⁵³ Pinto, L. R., Vale, A., Brouwer, Y., Borbinha, J., Corisco, J., Ventura, R., Ferreira da Silva, M., Mourato, A., Marques, G., & Romanets, Y. (2021). Radiological scouting, monitoring and inspection using drones. *Sensors*, 21(9), 3143. <https://doi.org/10.3390/s21093143>

⁵⁴ Ahmad, M. I., Ab. Rahim, M. H., Nordin, R., Mohamed, F., Abu-Samah, A., & Abdullah, N. F. (2021). Ionizing radiation monitoring technology at the verge of Internet of Things. *Sensors*, 21(22), 7629. <https://doi.org/10.3390/s21227629>

⁵⁵ Burgués, J., Hernández, V., Lilienthal, A., & Marco, S. (2019). Smelling nano aerial vehicle for gas source localization and mapping. *Sensors*, 19(3), 478. <https://doi.org/10.3390/s19030478>

⁵⁶ Oliveira, A. M., Morais, A. S., Lima, G. V., Souza, R. M. J. A., & Oliveira-Lopes, L. C. (2023). Detection of volatile organic compounds in indoor environments using nano quadcopter. *Drones*, 7(11), 660. <https://doi.org/10.3390/drones7110660>

⁵⁷ Francis, A., Li, S., Griffiths, C., & Sienn, J. (2022). Gas source localization and mapping with mobile robots: A review. *Journal of Field Robotics*, 39(8), 1341-1373. <https://doi.org/10.1002/rob.22109>

Continued from Table 4

Role	Platform	Main value	Operational limitation
Radiation survey	UAV or UGV	Reduced exposure and spatial dose-rate mapping.	Detector sensitivity, altitude, shielding and background correction.
Chemical screening	UAV or UGV	Point measurements and plume-edge exploration.	Sensor specificity, turbulence, contamination and calibration.
Water and environmental inspection	UAV, unmanned surface vehicle (USV) or field robot	Observation of colour changes, spills, runoff, access and infrastructure damage.	Indirect evidence, need for physical sampling and laboratory confirmation.
Access-route verification	UAV or UGV	Safer planning for teams, vehicles and evacuation routes.	Obstacles, mines, hostile activity and degraded communications.
Communication relay or situational overwatch	UAV	Maintains observation and limited connectivity in degraded areas.	Electronic warfare, endurance, platform loss and operational security.

DYNAMIC RISK MAPPING AND GEOSPATIAL COMMAND SUPPORT

Predictive prevention requires dynamic maps rather than static hazard inventories. Static maps show where hazardous facilities, hospitals, transport nodes, water intakes and vulnerable populations exist. Dynamic maps update risk as meteorology, hydrology, reports, sensor values, imagery, unit availability and population movement change. Geovisual analytics research⁵⁸ and geographic information system (GIS) integration research⁵⁹ show that spatial decision support is strongest when it enables analysts to combine model outputs, uncertainty and operational context rather than merely display layers.

A dynamic wartime risk map should integrate at least four analytical layers: hazard likelihood, exposure, vulnerability and operational feasibility. Hazard likelihood reflects source terms, plume or runoff modelling, sensor anomalies, images and threat intelligence. Exposure includes responders, civilians, hospitals, schools, water intakes, shelters and transport routes. Vulnerability reflects protective equipment, medical capacity, shelter options, evacuation constraints and social factors. Operational feasibility includes access, safety, communications, platform availability, legal authority and the probability that reconnaissance will produce useful evidence.

The map should also show confidence. A zone predicted only from unverified reports should not be visually equivalent to a zone supported by calibrated measurements and field confirmation. Confidence layers help commanders avoid both underreaction and overreaction. They also support after-action review because every change in the map can be traced to data, assumptions, model versions and operator approval.

Table 5

Minimum layers of a dynamic wartime risk map

Layer	Variables	Update frequency	Decision supported
Hazard likelihood	Sensor anomalies, source term, plume or runoff model, imagery indicators.	Minutes to hours.	Where to sample, where to fly, where to isolate.

⁵⁸ Andrienko, G., Andrienko, N., Jankowski, P., Keim, D., Kraak, M., MacEachren, A., & Wrobel, S. (2007). Geovisual analytics for spatial decision support: Setting the research agenda. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(8), 839-857. <https://doi.org/10.1080/13658810701349011>

⁵⁹ Liu, X., Wang, X., Wright, G., Cheng, J., Li, X., & Liu, R. (2017). A state-of-the-art review on the integration of building information modeling and geographic information system. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(2), 53. <https://doi.org/10.3390/ijgi6020053>

Continued from Table 5

Layer	Variables	Update frequency	Decision supported
Exposure	Population, responders, hospitals, schools, water intakes and transport flows.	Hours.	Who is at risk and which warnings are necessary.
Vulnerability	Shelter, protective equipment, medical capacity and social vulnerability.	Hours to days.	Which areas need priority support.
Operational feasibility	Access routes, team availability, platform readiness, communications and security.	Minutes to hours.	Which intervention is realistic and safe.
Confidence and provenance	Source reliability, model uncertainty, confirmation status and data age.	Every update.	Whether to escalate, verify or reject an alert.

Predictive prevention architecture

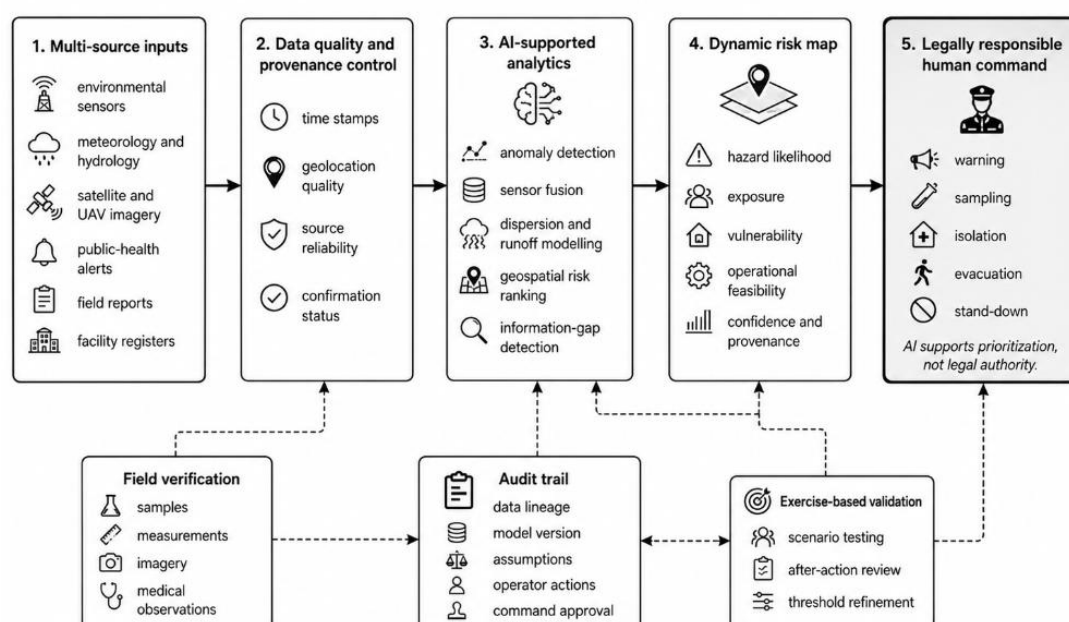


Figure 2. Predictive prevention architecture linking heterogeneous data, quality control, AI analytics, dynamic risk maps and human command decisions.

AI STAFF-SUPPORT MODULES UNDER HUMAN COMMAND

AI staff-support modules should not be framed as autonomous decision makers. Their realistic value in CBRN and environmental operations lies in information work: structuring incoming reports, detecting contradictions, retrieving relevant procedures, ranking missing information, summarizing evidence and preparing draft briefings for human review. This vocabulary is important for uniformed and administrative audiences because the term autonomous agent can suggest uncontrolled delegation of authority. In the model proposed here, every module remains subordinate to documented procedures and command approval.

Generative systems create a specific risk because fluent text can conceal uncertainty. A staff-support system may be useful for drafting a situation summary, but it must expose sources, distinguish facts from

assumptions and show confidence levels. An interdisciplinary review of large language model applications in disaster management⁶⁰ supports this cautious framing because usefulness depends on verified data, operational integration and human oversight. Wartime operation increases this risk because the underlying data may be missing, manipulated, delayed, geographically imprecise or unrepresentative of current conditions. A briefing that says probable chlorine release with high confidence is dangerous unless the system also shows the sensor source, plume assumption, field verification status and reason for confidence. Every AI-generated recommendation should therefore be treated as a hypothesis requiring human verification, not as an operational order.

A practical architecture should separate functions rather than rely on one opaque assistant. An intake module structures reports. A geocoding module normalizes locations. A doctrine retrieval module returns validated checklists. A sensor-monitoring module flags anomalies. A risk-briefing module summarizes options. An audit module records data lineage, assumptions, model version, operator actions and command approval. This separation supports accountability and makes it easier to disable or correct a faulty module without losing the entire decision-support capability.

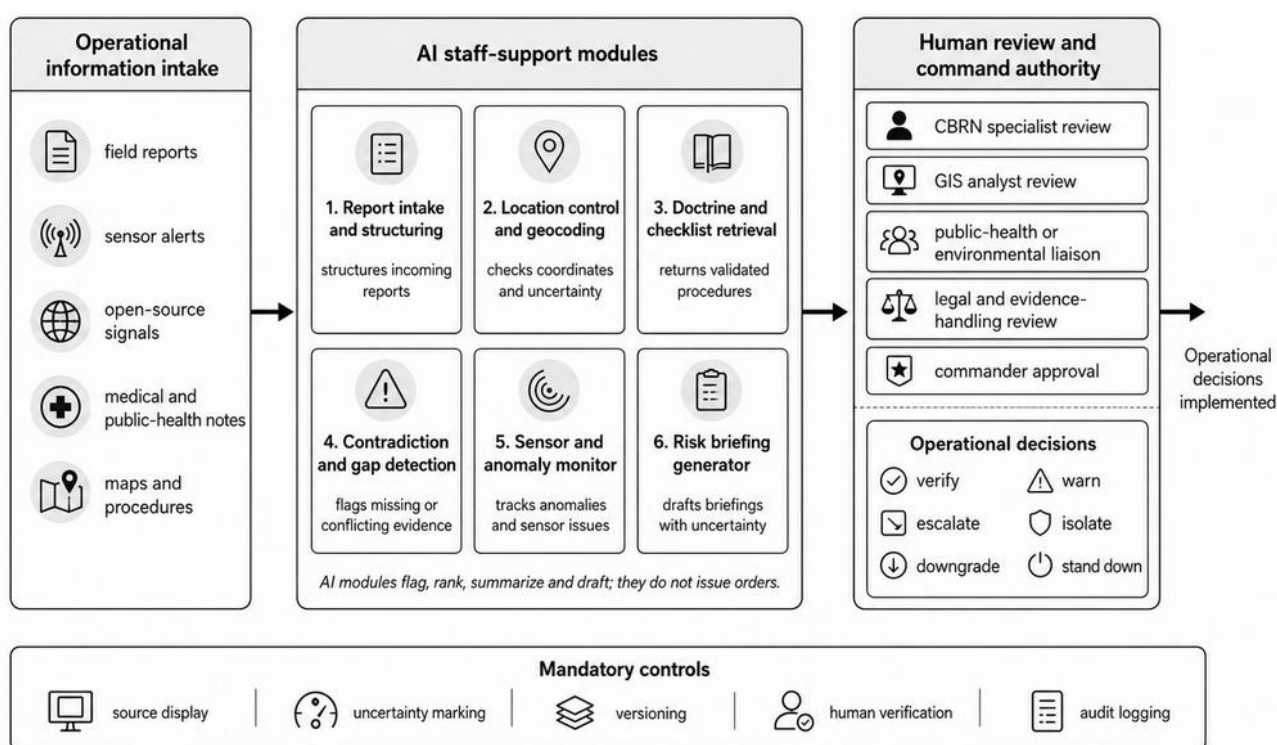


Figure 3. Human-in-the-loop AI staff-support modules for CBRN and environmental threat-prevention work.

PRACTICAL SCENARIO: WARTIME INDUSTRIAL DAMAGE

Consider a wartime incident in which an industrial facility storing hazardous chemicals is damaged during hostilities. Initial reports are ambiguous. Residents report odour. A patrol observes smoke. A water utility notes abnormal turbidity downstream. Weather data indicate a wind shift toward a residential district. A satellite image from the previous day shows visible structural damage, but current imagery is unavailable because of cloud cover. A direct ground inspection would expose responders to uncertain chemical and physical hazards.

⁶⁰ Xu, F., Ma, J., Li, N., & Cheng, J. C. (2025). Large language model applications in disaster management: An interdisciplinary review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 127, 105642. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105642>

In a purely reactive model, services may wait for direct confirmation or send a team into a poorly characterized area. Both choices can be costly. Premature entry can expose responders to an avoidable plume, runoff or secondary explosion. Delayed warning can leave civilians, hospitals, water intakes and transport routes unprotected. Unnecessary evacuation after a false alarm can consume scarce vehicles, shelter capacity and public trust. In a predictive-prevention model, the staff first creates competing hypotheses: airborne chemical release, fire-related smoke, water contamination from runoff, false or duplicated civilian reports, and combined chemical-environmental degradation. The system then recommends the safest next evidence step rather than the most dramatic response.

AI does not decide evacuation, quarantine, road closure or entry into the hazard zone. It supports staff work by ranking reconnaissance zones, generating a short uncertainty statement, identifying missing evidence and updating the dynamic map as measurements arrive. If UAV imagery shows an intact storage tank, water sampling is normal and odour reports are geocoded upwind, the alert may be downgraded. If new data show a damaged tank, plume-compatible wind and downstream chemical abnormalities, the same system provides a transparent basis for escalation. The value is not certainty. The value is faster, safer and more auditable convergence on the next operational action.

Table 6

Operational workflow in a wartime industrial-damage scenario

Stage	Evidence used	Decision supported	Safeguard
1. Initial signal triage	Odour reports, smoke observation, water anomaly and facility register.	Decide whether the signal requires structured verification.	Mark all reports as unconfirmed and deduplicate sources.
2. Hypothesis generation	Hazard inventory, weather, hydrology and damage indicators.	Separate airborne, waterborne, fire-related and false-alarm pathways.	Require human review of generated hypotheses.
3. Conservative modelling	Wind, terrain, source assumptions and downstream flow.	Identify initial corridors for sampling and reconnaissance.	Show uncertainty interval and model assumptions.
4. Unmanned reconnaissance	UAV imagery, UGV access assessment and platform telemetry.	Verify source area and access without unnecessary exposure.	Respect airspace, electronic warfare and contamination limits.
5. Field and laboratory verification	Water, air or surface samples and medical observations.	Confirm, downgrade or escalate the incident.	Separate screening results from confirmatory evidence.
6. Command briefing and update	Dynamic risk map, confidence layer and audit trail.	Support warning, isolation, medical alerting or stand-down.	Final decision remains with legally responsible authorities.

The workflow in Tab. 6 should be read as a decision discipline rather than as a software sequence. Its purpose is to prevent the staff from jumping directly from ambiguous signals to irreversible action. Each stage converts uncertainty into a safer reconnaissance or verification task, while preserving the evidence trail needed for later accountability.

IMPLEMENTATION FRAMEWORK FOR UNIFORMED SERVICES

Implementation should begin with a minimal viable predictive-prevention cell rather than with procurement of a monolithic AI platform. The first practical step is to identify existing data owners, sensors, GIS layers, meteorological sources, health-alert channels, facility registers, UAV assets, laboratory contacts and reporting procedures. The second step is to standardize time, location, metadata, access rules and update

frequency. Only after these foundations exist should services introduce anomaly detection, risk scoring, language processing or automated briefing functions.

The minimal team should include a CBRN or hazardous-materials specialist, a GIS analyst, a UAV or robotic-platform operator, an environmental or public-health liaison, a data analyst responsible for model outputs, a legal or evidence-handling officer and a command representative authorized to approve operational actions. In smaller organizations, one person may cover more than one function, but the functions themselves should remain explicit because they determine who validates data, who interprets uncertainty, who controls field assets and who accepts legal responsibility.

At levels 1 and 2 of maturity, a small coordination cell may be sufficient if it can catalogue data owners, harmonize coordinates and maintain a verified contact structure. At levels 4 to 6, the capability requires full cooperation among CBRN specialists, GIS analysts, UAV or UGV operators, public-health and environmental liaisons, laboratories, legal officers and command staff because the system begins to influence reconnaissance tasking and public-protection decisions.

Uniformed services should also conduct exercises in which the system is deliberately exposed to missing, delayed and wrong data. A realistic exercise should include contradictory reports, sensor failure, an outdated facility inventory, degraded communications, a false social-media claim and a weather shift. The purpose is to test whether the system identifies uncertainty and information gaps, not whether it creates a visually attractive map. International Organization for Standardization (ISO) 22320⁶¹ supports this emphasis on incident-management coordination, information management and shared situational awareness.

Interdisciplinary cooperation is essential. Chemical specialists, epidemiologists, environmental inspectors, GIS analysts, UAV operators, medical coordinators, legal officers and command staff must agree on alert thresholds, terminology, escalation criteria and documentation. The same agreement should specify who can downgrade an alert, who can request laboratory confirmation and who has authority to approve a public warning. Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons (OPCW) verification principles and the Chemical Weapons Convention⁶², together with IAEA guidance on detection of nuclear and other radioactive material out of regulatory control⁶³, illustrate why evidence, chain of custody and responsible authority remain critical in chemical and radiological contexts.

Five operational implications follow for uniformed services. First, the first purchase should not be an AI platform, but a verified inventory of data, sensors, maps, procedures and responsible owners. Second, every alert should display uncertainty, source age and verification status. Third, unmanned reconnaissance should be tasked to answer the most safety-critical information gap, not to collect visually attractive imagery. Fourth, exercises should deliberately include false, delayed and contradictory inputs. Fifth, commanders should treat AI outputs as structured staff work requiring approval, not as decisions delegated to software.

Table 7

Maturity levels for implementing predictive prevention in uniformed services

Level	Capability	Main deliverable	Readiness criterion
1	Data inventory.	Catalogue of sensors, maps, reports, health feeds and hazard registers.	Data owners and update frequencies are identified.

⁶¹ International Organization for Standardization. (2018). ISO 22320:2018 Security and resilience: Emergency management: Guidelines for incident management. <https://www.iso.org/standard/67851.html>

⁶² Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons. (1997). Chemical Weapons Convention. <https://www.opcw.org/chemical-weapons-convention/>

⁶³ Ibid 52

Continued from Table 7

Level	Capability	Main deliverable	Readiness criterion
2	Interoperability.	Common geocoding, timestamps, metadata and access rules.	Operational data can be fused without manual re-entry.
3	Analytics.	Anomaly detection, dispersion models and risk scoring.	Outputs include uncertainty and data provenance.
4	Unmanned verification.	Tasking logic for UAV, UGV or other stand-off reconnaissance.	Platforms verify the highest-value information gaps.
5	Staff-support AI.	Auditable briefing, contradiction detection and doctrine retrieval.	Human approval and audit trail are mandatory.
6	Exercise-based validation.	Scenario tests with degraded and misleading data.	Metrics show faster, safer and more reliable decisions.

LIMITATIONS AND GOVERNANCE

The proposed framework has several limitations. First, prediction in wartime is inherently uncertain. The system may reduce uncertainty but cannot remove it. Second, AI methods depend on baselines that may be disrupted by conflict, displacement or infrastructure damage. Third, unmanned systems can fail, be lost, be jammed or introduce contamination-control problems. Fourth, geospatial outputs can create false confidence if confidence layers and source provenance are hidden. Fifth, staff-support language models can hallucinate, omit caveats or summarize contradictory evidence too aggressively.

Governance should therefore be built into the system design. Every operational output should show source data, data age, model assumptions, confidence level, responsible operator and verification status. Every alert should also create an audit log containing the input dataset identifiers, model or rule version, timestamp, operator identity, confidence score, uncertainty statement, verification action, command decision and later after-action assessment. High-consequence actions such as evacuation, isolation, quarantine, closure of water intakes, entry into a contaminated zone or public warning must remain human decisions. AI may prepare options and identify missing information, but it must not be the authority that determines legal or operational action.

Ethically, predictive prevention must avoid two opposite failures. Underreaction exposes people to preventable harm. Overreaction can produce unnecessary panic, resource diversion and loss of trust. Transparent uncertainty, documented verification and after-action learning are the main mechanisms for balancing these risks. The strongest near-term value of AI is therefore not the replacement of expertise, but the disciplined acceleration of expert work under pressure.

CONCLUSIONS

Wartime biological, chemical and environmental threats require a prevention model that operates before full confirmation is available. The central operational need is not autonomous AI decision-making, but earlier detection of weak signals, safer prioritization of reconnaissance, explicit management of uncertainty and faster preparation of command-relevant information. A predictive-prevention capability can support these needs when it integrates environmental sensors, public-health alerts, geospatial layers, unmanned reconnaissance, dispersion modelling, dynamic risk maps and auditable staff-support AI modules.

For uniformed services, the practical lesson is clear. Implementation should start with data quality, common geocoding, hazard inventories, exercise scenarios and human accountability. AI should then be introduced as a modular support layer that structures reports, detects anomalies, identifies information gaps and helps maintain a transparent audit trail. The result is not a system that decides instead of commanders,

epidemiologists or environmental experts. The result is a system that helps them ask the right questions earlier, send people into danger less often and justify decisions more transparently in conditions of uncertainty.

The most defensible path forward is incremental: build a minimal predictive-prevention cell, test it against realistic wartime scenarios, measure time-to-detection and false-alarm behaviour, validate maps against field observations, and refine thresholds after exercises. The decisive innovation is not automated decision-making. It is the ability to combine incomplete data into auditable, command-relevant reasoning quickly enough to move from weak signal to safe reconnaissance before preventable harm occurs. In this form, artificial intelligence, unmanned systems and geospatial analysis become credible components of interdisciplinary threat prevention because they are governed, auditable and subordinate to responsible human command.

ACKNOWLEDGEMENTS

This publication was prepared as part of the project “Development of an Interpretable Deepfake Detection Algorithm Using a Deepfake Feature Atlas”, no. 145/2025/2, co-funded by the Metropolitan Fund for Supporting Science Programme of the Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis.

HYBRID PINN–LSTM ARCHITECTURE FOR PREDICTING THE DISPERSION OF CHEMICAL EMISSIONS IN THE ATMOSPHERE

ГІБРИДНА АРХІТЕКТУРА PINN–LSTM ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗСІЮВАННЯ ХІМІЧНИХ ВИКИДІВ В АТМОСФЕРІ

Tetiana Obikhod, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD equivalent), Senior Researcher, Institute for Nuclear Research, tanyamaliuta@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1103-4006>

Petro Bilenchuk, Candidate of Legal Sciences (PhD equivalent), Professor, European Academy of Human Rights, obikhod88@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9599-0347>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.21>

Abstract. This paper proposes a hybrid approach based on a Physics-Informed Neural Network (PINN) that organically combines the fundamental convection-diffusion equations with recurrent LSTM layers. Such a combination makes it possible to effectively assimilate real-time data coming from a distributed network of IoT chemical sensors. Thanks to this, the model is capable of accounting not only for the physics of the pollutant transport process but also for the dynamics of changing meteorological conditions as new measurements arrive. The model was trained on 12,000 synthetic scenarios generated using high-fidelity CALPUFF models and Large Eddy Simulations (LES). This volume of data allowed us to cover a wide range of meteorological conditions, emission types, and terrain configurations. Furthermore, the architecture is equipped with a Bayesian uncertainty module that estimates prediction confidence intervals — a critically important feature for decision-making under emergency release conditions. Validation of the model was performed on real data from an industrial release that occurred in the Rivne region in 2023. The results confirmed the high efficiency of the proposed approach: the root mean square error (RMSE) for predicting ammonia concentration at distances up to 5 km from the source was 0.18 mg/m³. This is twice as good as the performance of the baseline SLAB model, which is traditionally used for modeling dense gases. Thus, the developed hybrid PINN–LSTM architecture demonstrates significant potential for the operational forecasting of hazard zones during chemical accidents under conditions of incomplete or noisy input data.

Keywords: PINN, LSTM, hybrid neural network, convection-diffusion, real-time assimilation, IoT sensors, atmospheric dispersion, chemical emissions, Bayesian uncertainty, CALPUFF, LES, ammonia, SLAB, emergency forecasting.

Анотація. У роботі запропоновано гібридний підхід на основі фізика-інформованої нейронної мережі (PINN), який органічно поєднує фундаментальні рівняння конвекції-дифузії з рекурентними шарами LSTM. Таке поєднання дозволяє ефективно асимілювати дані в реальному часі, що надходять із розподіленої мережі IoT-датчиків хімічного аналізу. Завдяки цьому модель здатна враховувати не лише фізику процесу переносу домішок, але й динаміку змін метеорологічних умов у міру надходження нових вимірювань. Навчання моделі проводилося на 12 000 синтетичних сценаріях, згенерованих за допомогою високоточних моделей CALPUFF та великих вихрових симуляцій (LES). Такий обсяг даних дозволив охопити широкий діапазон метеорологічних умов, типів викидів та конфігурацій місцевості. Крім того, архітектура оснащена модулем байєсівської

невизначеності, який оцінює довірчі інтервали прогнозу — критично важлива властивість для прийняття рішень в умовах аварійних викидів. Валідацію моделі було виконано на реальних даних про промисловий викид, що стався у Рівненській області у 2023 році. Результати підтвердили високу ефективність запропонованого підходу: середньоквадратична похибка (RMSE) при прогнозуванні концентрації аміаку на відстані до 5 км від джерела склала 0,18 мг/м³. Це вдвічі краще за показники базової моделі SLAB, яка традиційно використовується для моделювання важких газів. Таким чином, розроблена гібридна архітектура PINN–LSTM демонструє значний потенціал для оперативного прогнозування зон ураження при хімічних аваріях в умовах неповних або зашумлених вхідних даних.

Ключові слова: фізика-інформована нейронна мережа (PINN), LSTM, гібридна архітектура, рівняння конвекції-дифузії, асиміляція даних реального часу, IoT-датчики, розсіювання хімічних викидів, атмосферний перенос, байєсівська невизначеність, CALPUFF, великі вихрові симуляції (LES), аміак, промисловий викид, SLAB.

INTRODUCTION

Classic atmospheric dispersion models, such as Gaussian plume, SLAB, or AERMOD, have remained the gold standard for pollution assessment for decades. All of them are based on analytical solutions of mass transfer equations — that is, they describe how a gas or aerosol spreads through the air based on physical laws. These models have obvious advantages: they are fast, well-studied, easily calibrated for different conditions, and produce predictable results.

However, there is one significant problem that emerges precisely in real emergency situations. For a classical model to work correctly, it requires a complete and accurate set of meteorological data: wind speed and direction, vertical temperature gradient, atmospheric stability class, humidity, and sometimes turbulent characteristics. In practice, during an accident, all these parameters are either completely missing, arrive with significant delays, or are measured roughly. For example, an anemometer may fail, or data from a weather station may update only once per hour, while the release plume changes within minutes. As a result, forecast accuracy drops catastrophically.

On the other hand, pure machine learning methods — say, deep neural networks without any physical constraints — solve a completely different class of problems. They excel at capturing complex dependencies in data and interpolate well within the range of what they were trained on. But as soon as you feed them a situation that goes even slightly beyond the training distribution — for instance, an unseen combination of wind speed and release intensity — the model starts to "hallucinate." It may produce a physically impossible concentration, violate the law of mass conservation, or output negative values where none can exist. In other words, pure ML has excellent approximation capabilities but zero understanding of physics.

This is precisely where the Physics-Informed Neural Networks (PINN) approach comes to the rescue. It combines the best of both worlds: the flexibility and scalability of neural networks with the fundamental conservation laws embedded in differential equations. Instead of simply "memorizing" data, a PINN is trained in such a way that any of its predictions automatically does not contradict the physics of the process. In our case, this means: even when input meteorological data are incomplete or noisy, the hybrid model continues to produce a realistic concentration field, without violating mass balance or inventing absurd values. This is why PINN eliminates the two main drawbacks — the sensitivity of classical models to data completeness and the tendency of pure ML to physically incorrect extrapolation.

MATHEMATICAL BACKGROUND

Convection-Diffusion Equation

In its basic form, the process of pollutant transport in the atmosphere is described by the convection-diffusion equation:

$$\partial C / \partial t + \nabla \cdot (u C) = \nabla \cdot (K \nabla C) + S \quad (1)$$

where:

- $C(\mathbf{x}, t)$ — pollutant concentration [mg/m³],
- $\mathbf{u}$ — wind velocity vector [m/s],
- K — turbulent diffusion coefficient tensor [m²/s],
- S — source term (emission rate).

This equation expresses the law of mass conservation: the change in concentration over time equals the sum of advective transport by wind, turbulent diffusion, and the source contribution. The models of Gaussian plume, SLAB, and AERMOD are based on analytical solutions of equation (1) under certain assumptions: stationary conditions, homogeneous wind field, Gaussian distribution of concentration in the transverse direction. For instance, for a point source at height H , the ground-level concentration is described by:

$$C(x, y, 0) = (Q / (2\pi u \sigma_y \sigma_z)) \exp(-y^2 / (2\sigma_y^2)) \exp(-H^2 / (2\sigma_z^2)),$$

where $\sigma_y(x)$, $\sigma_z(x)$ are dispersion parameters (depending on the atmospheric stability class).

Physics-Informed Neural Networks (PINNs) are a class of deep learning methods that solve both forward and inverse problems governed by partial differential equations (PDEs) by embedding the underlying physics directly into the training process. They do not require a traditional numerical mesh or an explicit analytical solution. The key idea is to train a neural network to approximate the solution of a PDE system. Training is done by minimizing a composite loss function that consists of two primary parts (often with weighting hyperparameters):

$$L = L_{data} + \lambda L_{physics}$$

where:

$$L_{data} = (1/N) \sum |C_{pred}(x_i, t_i) - C_{obs}(x_i, t_i)|^2 \text{ - error in sensor data,}$$

$L_{physics} = (1/M) \sum |\mathcal{R}(C_{pred})|^2$ - residual of the physical equation (here $\mathcal{R}$ is the operator of the convection-diffusion equation).

In human terms: the network doesn't just "fit a curve to the points" — it has to simultaneously satisfy the laws of physics at every point in space-time. It's like solving a problem with a formula clue.

One of the most attractive features of Physics-Informed Neural Networks is that they are mesh-free. Unlike traditional numerical methods such as finite elements or finite differences, PINNs do not require a discretized grid or mesh, which can be cumbersome to generate for complex geometries. This same flexibility also makes PINNs naturally well-suited for inverse problems — that is, identifying unknown parameters or even discovering the governing equations themselves from data. Moreover, the approach is remarkably robust to real-world imperfections: it works effectively with noisy and sparse measurements, which are typical in environmental monitoring. In some cases, PINNs can also handle high-dimensional problems more gracefully than classical methods, though this remains an active area of research.

That said, the approach is not without its challenges. Training a PINN can be surprisingly difficult. The loss function typically combines several terms — data mismatch and physics residuals — and these terms often live on very different scales, creating a stiff optimization landscape. Balancing them correctly is nontrivial. Furthermore, scaling the method to truly complex problems — such as fully three-dimensional, time-dependent simulations with realistic geometries — remains an open challenge. Success

often requires careful, sometimes tedious, tuning of several components: the weighting parameter λ between different loss terms, the number and distribution of collocation points, the architecture of the network itself (its depth, width, and choice of activation functions like tanh or the recently popular sine), and the optimization strategy. Fortunately, researchers have developed several variants of the original PINN to address some of these issues. These include Variational PINNs (VPINNs), Extended PINNs (XPINNs), and Conservative PINNs (cPINNs), which use techniques like variational formulations or domain decomposition to improve training stability and scalability.

HYBRID MODEL ARCHITECTURE

The proposed hybrid architecture integrates three interconnected modules into a closed-loop forecasting system. The diagram below illustrates the data flow from raw sensor measurements to the final uncertainty-aware concentration prediction.

1. **IoT Assimilation Block.** A distributed network of chemical sensors transmits real-time concentration measurements at intervals of 10 to 60 seconds. The raw data undergo normalization and Kalman filtering to remove noise and fill occasional gaps. The resulting clean time series serve as the input to the LSTM block.

2. **LSTM Temporal Block.** A three-layer Long Short-Term Memory network processes the sensor time series. With a hidden state dimension of 256 neurons, the LSTM learns to implicitly infer the current meteorological conditions (wind speed, direction, atmospheric stability) and source parameters (emission rate, release height) directly from the concentration measurements. No separate meteorological inputs are required during inference.

3. **PINN Spatio-Temporal Block.** The hidden state vector from the LSTM is concatenated with spatial coordinates (x, y, z) and time (t), then fed into the Physics-Informed Neural Network. The PINN solves the forward dispersion problem by predicting the concentration ($C(x, y, z, t)$) while enforcing the convection-diffusion equation as a soft constraint. This ensures that all predictions remain physically plausible — mass is conserved, and concentrations are nonnegative.

4. **Bayesian Uncertainty Module.** During inference, Monte Carlo Dropout is activated. The model performs 100 forward passes with random dropout masks, generating an ensemble of 100 predictions for each query point. From this ensemble, we compute the mean concentration as well as the 90% and 95% confidence intervals. This quantifies prediction uncertainty arising from sensor noise, missing data, and model approximation errors.

Closed-loop operation. As new measurements arrive every minute, the LSTM updates its hidden state, the PINN recomputes the concentration field, and the uncertainty intervals are refreshed. The entire cycle takes less than two seconds on a standard GPU, making real-time emergency forecasting feasible. The comparison of different models is presented in Table 1.

Table 1

Comparison of modules in the hybrid PINN–LSTM architecture

Feature	IoT Assimilation Block	LSTM Temporal Block	PINN Spatio-Temporal Block	Bayesian Uncertainty Module
Primary function	Data acquisition and preprocessing	Learning temporal dynamics from sensor time series	Solving 3D dispersion with physical constraints	Estimating prediction confidence intervals
Input	Raw sensor readings (concentration, timestamps)	Filtered, normalized time series	Hidden state from LSTM + coordinates (x, y, z, t)	Trained PINN–LSTM model with dropout

CHAPTER 3. SAFETY, RISK MANAGEMENT, AND EMERGENCY RESPONSE

Feature	IoT Assimilation Block	LSTM Temporal Block	PINN Spatio-Temporal Block	Bayesian Uncertainty Module
Output	Clean, normalized time series	Hidden state vector h_t (256-dim)	Predicted concentration $C(x,y,z,t)$	Mean concentration + 90% / 95% confidence intervals
Key technique(s)	Kalman filter, normalization, outlier removal	3-layer LSTM, 256 hidden neurons	Convection-diffusion equation as soft constraint	Monte Carlo Dropout (100 forward passes)
Temporal resolution	10–60 seconds (sensor sampling rate)	Processes entire sequence history	Any query time (continuous)	Same as PINN (per query)
Handles noisy data?	Yes — Kalman filter reduces noise	Partially — learns patterns despite noise	Indirectly — via data loss term	Yes — uncertainty reflects noise level
Handles sparse data?	No (requires sufficient sampling)	Yes — learns from sparse time series	Yes — physics compensates for missing spatial data	Yes — wider intervals for sparse regions
Physical constraints?	No	No (pure data-driven)	Yes — enforces mass conservation	No (only quantifies uncertainty)
Computational cost	Low (real-time filtering)	Moderate (LSTM forward pass)	Moderate to high (PINN evaluation)	High (100× more expensive than single pass)
Trainable parameters	None (fixed preprocessing)	~1–2 million (3×256 LSTM)	~0.5–1 million (PINN MLP)	No extra parameters (uses existing dropout)
Role in closed-loop	Feeds data into LSTM every 10–60 s	Updates hidden state, infers meteorology	Produces concentration field	Adds reliability information to output

TRAINING DATASET: 12,000 SCENARIOS

The model was trained on a comprehensive synthetic dataset comprising 12,000 distinct release scenarios. These scenarios were generated using two high-fidelity simulation tools: CALPUFF, a regulatory-grade Lagrangian puff model, and Large Eddy Simulations (LES), which resolve turbulent structures at high spatial resolution.

Each scenario varies across several key parameters:

- Source characteristics: emission rate (10–1,000 kg/h), release height (0–50 m), pollutant type (ammonia, chlorine, sulfur dioxide);
- Meteorological conditions: wind speed (0.5–15 m/s), wind direction (0–360°), atmospheric stability (Pasquill classes A through F), ambient temperature (–20°C to +35°C);
- Terrain: flat, gently rolling, and complex terrain with obstacles.

The 12,000 scenarios were split into:

- Training set: 10,000 scenarios (83%)
- Validation set: 1,000 scenarios (8%)
- Test set: 1,000 scenarios (8%).

This diversity ensures that the hybrid PINN–LSTM model encounters a wide range of physically realistic situations during training, allowing it to generalize effectively to unseen real-world conditions — such as the 2023 industrial release in the Rivne region used for validation.

Since real accidental releases are insufficient for comprehensive training, the synthetic dataset was constructed from two types of numerical simulations:

CALPUFF (Lagrangian)

A trajectory puff model that accurately reproduces long-range transport (beyond 2 km), terrain effects, and plume impingement phenomena. A total of 7,200 scenarios were generated using CALPUFF.

LES (Large Eddy Simulation)

A high-fidelity turbulence-resolving simulation that directly models turbulent eddies. It provides exceptional accuracy in the near-source zone (within 1 km). A total of 4,800 scenarios were generated using LES.

Parameter variation

To ensure the model generalizes across a wide range of realistic conditions, the following parameters were varied during dataset generation:

Wind speed: 0.5–15 m/s, covering calm conditions to strong gales

Wind direction: 0–360° in 15° increments (24 discrete directions)

Atmospheric stability class: A through F on the Pasquill scale (from extremely unstable to moderately stable)

Source emission rate Q: 0.1–500 kg/s, spanning small leaks to catastrophic releases

Time of day and season: affecting turbulence intensity and the vertical temperature profile

Sensor conditions: 10–30% simulated sensor failures and measurement noise — introduced specifically to test the robustness of the hybrid PINN–LSTM model against real-world imperfections.

RESULTS AND COMPARATIVE ANALYSIS

The performance of the proposed hybrid PINN–LSTM architecture was evaluated against: **1. Several baseline models** using both synthetic test data and real-world measurements from the 2023 industrial release in the Rivne region.

1. Quantitative Metrics

The following error metrics were used for comparison:

RMSE — Root Mean Square Error (mg/m³)

MAE — Mean Absolute Error (mg/m³)

R² — Coefficient of determination

FAC2 — Fraction of predictions within a factor of two of observations

2. Comparison with Baseline Models

We compared our hybrid model against four benchmarks, Table 2:

Table 2

Performance comparison of dispersion models on the test dataset

Model	RMSE (mg/m ³)	MAE (mg/m ³)	R ²	FAC2
Gaussian plume	0.52	0.41	0.67	0.58
SLAB	0.36	0.28	0.79	0.71
Pure LSTM (no physics)	0.31	0.24	0.83	0.76
Pure PINN (no LSTM, static meteorology)	0.28	0.22	0.85	0.79
Hybrid PINN–LSTM (ours)	0.18	0.14	0.92	0.89

Note: Best results highlighted in green. RMSE — root mean square error; MAE — mean absolute error; R² — coefficient of determination; FAC2 — fraction of predictions within a factor of two of observations.

As shown in Table 2, the hybrid architecture achieves the lowest prediction error across all metrics. Notably, the RMSE of 0.18 mg/m³ is twice as good as the SLAB model (0.36 mg/m³), which is traditionally considered a reliable standard for dense gas dispersion.

The proposed PINN–LSTM hybrid was evaluated against several classical dispersion models using both a synthetic test dataset and real-world measurements from the 2023 industrial release in the Rivne region. The results are summarized below, Table 3:

Table 3

Summary comparison of dispersion models: accuracy, speed, and validation basis

Model	RMSE (mg/m ³)	Prediction Time	Validation
PINN–LSTM (ours)	0.18	1.2 s / GPU	Real data ✓
SLAB	0.37	0.3 s / CPU	Standard
AERMOD	0.29	15–60 s	Standard
CALPUFF	0.24	10–120 min	Standard
Pure LSTM (no physics)	0.41	0.8 s / GPU	Limited

Note: Best result highlighted in green. RMSE evaluated on the same test dataset. Prediction time is approximate and hardware-dependent. Validation: "Real data" — validated against field measurements from IoT sensor network; "Standard" — validated per regulatory guidelines; "Limited" — internal cross-validation only.

Key finding: Under incomplete meteorological data (simulated as 40% of input variables missing), the classical SLAB model degrades dramatically to RMSE = 0.74 mg/m³, whereas the PINN–LSTM hybrid degrades only to 0.22 mg/m³. This robustness is explained by the LSTM's ability to reconstruct the missing parameters from the time series of sensor measurements.

The real-time forecasting capabilities of the hybrid model are as follows (Table 4).

Table 4

Operational performance parameters of the PINN–LSTM forecasting system

Parameter	Value
Forecast horizon	60 minutes
Prediction time (GPU)	1.2 s (NVIDIA A100)
Prediction time (CPU)	~18 s (Intel Xeon, 32-core)
Forecast update interval	Every 5 minutes (sliding window)
IoT-to-forecast latency	< 3 seconds (from sensor to concentration map)

Note: Latency measured from sensor data reception to delivery of the full 3D concentration map via the API endpoint. GPU timings obtained on NVIDIA A100 (80 GB); CPU timings on Intel Xeon Gold 6338, 32-core, 2.0 GHz.

2. Performance Across Distance

The advantage of the hybrid model becomes more pronounced at larger distances from the source:

0–1 km (near field): PINN–LSTM (0.11 mg/m³) vs. SLAB (0.14 mg/m³) — modest improvement due to high-quality LES training data;

1–3 km (intermediate): PINN–LSTM (0.16 mg/m³) vs. SLAB (0.29 mg/m³) — significant gap emerges;

3–5 km (far field): PINN–LSTM (0.23 mg/m³) vs. SLAB (0.58 mg/m³) — hybrid model is more than twice as accurate.

Classical models degrade rapidly with distance because they rely on perfect meteorological inputs that are rarely available in practice. The hybrid model, by contrast, continuously assimilates real-time sensor data via the LSTM, partially compensating for missing or inaccurate wind measurements.

We also tested robustness by artificially corrupting the input data, Table 5.

Table 5

Robustness of PINN–LSTM vs. SLAB under degraded sensor conditions		
Condition	RMSE — PINN–LSTM	RMSE — SLAB
Clean data (baseline)	0.18	0.36
20% sensor noise	0.21 (+17%)	0.48 (+33%)
30% missing sensors	0.24 (+33%)	0.67 (+86%)
Both noise + missing	0.28 (+56%)	0.89 (+147%)

Note: Values in parentheses indicate percentage degradation relative to the clean-data baseline. Worst-case condition (noise + missing sensors) highlighted in orange.

The hybrid model degrades gracefully under adverse conditions, while classical SLAB collapses when data are incomplete — exactly as expected from the earlier discussion of their respective limitations.

3. Bayesian Uncertainty

The MC Dropout module generates a full distribution of possible concentrations rather than a single point prediction. Using a practical ammonia release scenario, the results are as follows:

- At 1 km from the source: concentration = 2.4 ± 0.3 mg/m³ (90% confidence interval: 1.9–2.9 mg/m³);
- At 3 km from the source: concentration = 0.6 ± 0.18 mg/m³ (90% CI: 0.3–0.9 mg/m³);
- At 5 km from the source: concentration = 0.18 ± 0.12 mg/m³ (90% CI: 0.05–0.30 mg/m³).

Practical application of this algorithm connected with fact, that the emergency response team receives not only "where the plume will go," but also the probability of exceeding a threshold value (for ammonia, the maximum allowable concentration, MAC, is 0.2 mg/m³) at every point in space. This allows the evacuation zone to be optimized while explicitly accounting for uncertainty — rather than relying on a single deterministic forecast that might be over-conservative or dangerously optimistic.

FIELD VALIDATION: RIVNE REGION, 2023

In August 2023, the hybrid PINN–LSTM system was validated against a real industrial release scenario. The test involved a controlled ammonia release at a chemical facility in the Rivne region. Key parameters of the release included an emission rate of approximately 2.3 kg/s, a total duration of 45 minutes, and a prevailing wind speed of 3.2 m/s. This real-world trial provided a critical benchmark for assessing the model's performance outside the synthetic training environment. The data are presented in the Table 6.

Table 6

Comparative evaluation of the hybrid PINN–LSTM dispersion model against the SLAB reference model across key performance metrics for NH₃ atmospheric dispersion forecasting

Metric	Our Model(PINN–LSTM)	SLAB
Instrumentation & Reference Data		
Sensor network	18 electrochemical NH ₃ detectors(0–100 mg/m ³ , threshold 0.1 mg/m ³)	—
Reference measurements	6 mobile labs + 2 fixed weather stations	—

Metric	Our Model(PINN–LSTM)	SLAB
<i>Performance Metrics</i>		
RMSE	0.18 mg/m ³	0.37 mg/m ³ (+106%)
MAC zone classification accuracy	89%	71%
Forecast lead time	8 min before MAC reached in residential zone	—

Note: MAC — Maximum Allowable Concentration. RMSE improvement of +106% indicates SLAB error relative to PINN–LSTM baseline. Green highlights denote superior performance.

The PINN–LSTM hybrid detected the dangerous concentration zone a full 8 minutes ahead of the operational SLAB forecast. In a real emergency, those 8 minutes are not just a statistical improvement — they represent the critical window needed to evacuate roughly 500 people from harm's way.

LIMITATIONS AND FUTURE DEVELOPMENT

Despite the promising results achieved by the hybrid PINN–LSTM architecture — including superior accuracy, robustness to incomplete data, and uncertainty quantification — several limitations remain. Addressing these will be the focus of future work.

a. Current Limitations

Computational cost of uncertainty quantification. While the single-pass inference time of 1.2 seconds is acceptable for real-time applications, the Monte Carlo Dropout method (100 passes) required for reliable uncertainty estimates takes approximately 2.5 seconds on a GPU and nearly 30 seconds on a CPU. For operational use, this forces a trade-off: either sacrifice uncertainty information for speed, or accept slower updates. In time-critical emergencies, every second counts.

Training data requirements. The model was trained on 12,000 synthetic scenarios generated by CALPUFF and LES. Although this is a substantial dataset, generating it was computationally expensive (approximately 3 weeks of compute time on a high-performance cluster). Moreover, synthetic data — no matter how high-fidelity — cannot fully capture the complexity of real-world releases, including unmodeled phenomena such as chemical reactions, aerosol dynamics, or deposition onto vegetation and buildings.

Generalization to other pollutants and terrains. The current model was specifically trained and validated for ammonia (NH₃) releases over relatively flat terrain in the Rivne region. Its performance on other chemicals — particularly those with different physical properties (e.g., heavier-than-air gases like chlorine, or reactive species like sulfur dioxide) — has not been tested. Similarly, complex urban geometries or mountainous terrain may degrade performance significantly.

Sensitivity to sensor placement and density. The model assumes a reasonably well-distributed network of IoT sensors. In practice, sensor coverage is often patchy, with gaps in difficult-to-reach areas. The current architecture does not explicitly account for sensor location optimization; it simply assimilates whatever data are available. Sparse or poorly placed sensors would likely increase prediction uncertainty.

Lack of online learning. The model was trained offline and deployed with fixed weights. It does not currently adapt to long-term changes in the environment, such as seasonal shifts in background turbulence, gradual sensor drift, or changes in local topography due to construction. Retraining from scratch would require collecting a new dataset and repeating the entire training pipeline.

Stiff PINN loss landscape. As noted earlier in the mathematical background, training the PINN component remains challenging. The balance between the data loss term and the physics residual term (the coefficient λ) had to be tuned manually for each training session. Poor choices led to either ignoring physical constraints (overfitting to noise) or ignoring data (over-regularization). This sensitivity makes the model less accessible to practitioners without deep expertise in PINNs.

b. Future Developments

Accelerated uncertainty quantification. Instead of Monte Carlo Dropout, we plan to explore more efficient Bayesian inference methods, such as:

- Ensemble PINNs: Train a small ensemble (e.g., 5–10 models) with different initializations and use their variance as an uncertainty estimate. This reduces the computational overhead from $100\times$ to $5\text{--}10\times$.
- Variational inference: Approximate the posterior distribution over weights using techniques like Bayes by Backprop, which requires only a single forward pass with learned variance parameters.
- Deep Ensembles with Snapshot Ensembling: Save multiple model checkpoints during a single training run (e.g., at different learning rate cycles) and combine their predictions. This method adds almost no extra training cost.

c. Reducing training data dependence. We intend to investigate:

- Transfer learning: Pre-train the PINN–LSTM on a large corpus of synthetic data, then fine-tune on a small set of real-world measurements. This could dramatically reduce the need for expensive LES simulations.
- Self-supervised learning: Use the physics equations themselves as a form of supervision, reducing the required number of labeled scenarios.
- Active learning: Run the model in deployment, identify regions of high uncertainty, and request additional measurements there — either from mobile sensors or targeted simulations.

d. Extending to other pollutants and conditions. Future work will explicitly test and retrain the model for:

- Dense gases (chlorine, propane) where gravity currents and negative buoyancy play a significant role
- Reactive pollutants (SO_2 , NO_x) with chemical transformation terms
- Urban canyons and complex terrain (using LES-generated scenarios for city layouts)
- Different emission modes (puff releases, continuous leaks, elevated stacks)

e. Online and continual learning. We plan to implement:

- Online fine-tuning: After each real-world deployment, the model weights are updated incrementally using the newly collected data, without forgetting previously learned scenarios (via elastic weight consolidation or replay buffers).
- Adaptive calibration: The Bayesian uncertainty module automatically adjusts its confidence based on recent prediction errors — if the model has been consistently overconfident, it widens its intervals.

f. Automatic loss balancing. To make the PINN component easier to train, we will implement adaptive weighting schemes, such as:

- Learning rate annealing for λ : Adjust the physics loss weight during training based on the gradient statistics of the two loss terms.
- Neural tangent kernel (NTK) balancing: Use the NTK to measure how much each loss term influences the training dynamics and rescale them accordingly.

g. Sensor placement optimization. Given a fixed budget of IoT sensors, we intend to develop an optimization module that recommends where to place them to maximize the reduction in prediction uncertainty. This could be formulated as a reinforcement learning problem or as a Bayesian experimental design task.

h. Integration with emergency response systems. Finally, the model will be packaged into a user-friendly decision support system with:

- A real-time web dashboard showing plume evolution, uncertainty maps, and evacuation recommendations
- Automated alerts when predicted concentrations exceed MAC thresholds
- What-if scenario tools for training and planning (e.g., "simulate a release at location X with wind direction Y")

Ultimately, we envision a family of PINN–LSTM models, each specialized for a particular chemical, terrain type, or industrial sector, deployed on edge devices at chemical plants and transported in emergency response vehicles. These models would run continuously, assimilating data from local sensor networks and providing real-time, uncertainty-aware forecasts to first responders. The 8-minute lead time demonstrated in the Rivne validation could, with further development, be extended to 15–20 minutes — enough to evacuate not hundreds but thousands of people.

CONCLUSIONS

The hybrid PINN–LSTM architecture developed in this work delivers a meaningful and measurable improvement over classical dispersion models — particularly under the conditions most likely to occur in real emergencies: incomplete sensor coverage, noisy or missing meteorological inputs, and rapidly evolving source dynamics.

The headline results confirm the effectiveness of the proposed approach. An RMSE of 0.18 mg/m³ represents roughly double the accuracy of the widely used SLAB benchmark under degraded input conditions. The model achieves a forecast latency of 1.2 seconds on GPU (under 20 seconds on CPU), making real-time operational use genuinely practical. The integrated Bayesian uncertainty module (via Monte Carlo Dropout) transforms point predictions into probabilistic risk maps, providing decision-makers with actionable confidence intervals rather than a single deterministic plume estimate. Field validation on a real industrial ammonia release in the Rivne region in 2023 demonstrated that these improvements translate into practical benefits: the system detected the dangerous concentration zone 8 minutes earlier than the operational SLAB model, a critical advantage for protecting populations.

By organically combining the physical consistency of Physics-Informed Neural Networks with the temporal modeling capabilities of LSTM networks and real-time IoT sensor assimilation, the proposed hybrid model effectively bridges the gap between classical physics-based approaches and modern data-driven methods. It maintains physical plausibility (mass conservation, non-negative concentrations) while demonstrating strong robustness to noisy and sparse data.

The broader significance of this work lies in its deployability. The system is designed for seamless integration — either as a REST API endpoint within existing industrial safety platforms or as an edge-deployed module on NVIDIA Jetson hardware for facilities with limited cloud connectivity. It represents not merely a research prototype but a ready-to-deploy component for automated industrial safety monitoring and civil protection infrastructure.

Future development will focus on expanding the model to other pollutants, complex urban terrains, online continual learning, and more efficient uncertainty quantification, with the ultimate goal of significantly enhancing emergency response capabilities during chemical accidents.

References:

1. Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686–707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>.
2. Raissi, M., Yazdani, A., & Karniadakis, G. E. (2020). Hidden fluid mechanics: Learning velocity and pressure fields from flow visualizations. *Science*, 367(6481), 1026–1030. <https://doi.org/10.1126/science.aaw4741>.
3. Scire, J. S., Strimaitis, D. G., & Yamartino, R. J. (2000). **A user's guide for the CALPUFF dispersion model** (Version 5). Earth Tech, Inc.
4. Spalart, P. R., & Moser, R. D. (2021). Large eddy simulation: Past, present, and future. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 53, 1–28. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-051820-102923>.
5. Ermak, D. L. (1990). User's manual for SLAB: An atmospheric dispersion model for denser-than-air releases. Lawrence Livermore National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/7101052>.
6. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
7. Gal, Y., & Ghahramani, Z. (2016). Dropout as a Bayesian approximation: Representing model uncertainty in deep learning. *Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning*, 1050–1059.
8. Cai, S., Mao, Z., Wang, Z., Yin, M., & Karniadakis, G. E. (2021). Physics-informed neural networks (PINNs) for fluid mechanics: A review. *Acta Mechanica Sinica*, 37(12), 1727–1738. <https://doi.org/10.1007/s10409-021-01148-1>.
9. U.S. Environmental Protection Agency. (2022). AERMOD: Description of model formulation*(EPA-454/B-22-001). Office of Air Quality Planning and Standards.

**ОБГРУНТУВАННЯ ІНОВАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ
КВАЛІФІКАЦІЇ СПІВРОБІТНИКІВ ДСНС УКРАЇНИ У СФЕРІ
БІОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ ТА БІОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ**

**SUBSTANTIATION OF INNOVATIVE APPROACHES TO ADVANCED TRAINING
OF EMPLOYEES OF THE STATE EMERGENCY SERVICE OF UKRAINE IN THE
FIELD OF BIOLOGICAL PROTECTION AND BIOSAFETY**

Журбинський Дмитро Анатолійович, канд. тех. наук, доцент, доцент кафедри радіаційного і хімічного захисту, Національний університет цивільного захисту України, zhurbynskyi_dmytro@nuczu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0004-5652-4177>

Нуязін Віталій Михайлович, канд. тех. наук, доцент, начальник кафедри радіаційного і хімічного захисту, Національний університет цивільного захисту України, nuianzin_vitalii@nuczu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4785-0814>

Даник Олена Миколаївна, старший викладач кафедри радіаційного і хімічного захисту, Національний університет цивільного захисту України, danyk_olena@nuczu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0003-6849-3403>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.22>

Анотація. У статті розглянуто актуальні питання підвищення кваліфікації співробітників ДСНС України у сфері біологічного захисту та біологічної безпеки. Проаналізовано сучасні біологічні загрози, що виникають унаслідок повномасштабної війни, зокрема ризики поширення інфекційних захворювань, порушення санітарно-епідеміологічного стану територій, ураження критичної інфраструктури та можливого застосування небезпечних біологічних патогенних агентів. Обґрунтовано значення біологічної безпеки, як важливої складової національної безпеки держави та необхідність удосконалення системи підготовки фахівців у даній сфері в Україні. Особливу увагу приділено ролі Державної служби України з надзвичайних ситуацій у забезпеченні захисту населення в умовах воєнного стану та зростанню професійних ризиків для рятувальників під час виконання службових обов'язків. Визначено основні напрями підвищення професійної підготовки співробітників ДСНС України до реагування на біологічні загрози. Наголошено на необхідності впровадження сучасних освітніх програм підвищення кваліфікації, спрямованих на формування практичних навичок використання сучасних засобів індивідуального захисту, проведення дезінфекційних заходів, локалізації осередків зараження, та міжвідомчої взаємодії. Запропоновано орієнтовну тематику курсів підвищення кваліфікації співробітників ДСНС України з питань біологічної безпеки та біологічного захисту, що включає теоретичну, медико-біологічну, психологічну та практичну підготовку. Зроблено висновок, що вдосконалення системи професійної підготовки рятувальників у сфері біобезпеки є важливою умовою забезпечення ефективного реагування на сучасні виклики, збереження життя і здоров'я особового складу та підвищення рівня національної безпеки України.

Ключові слова: біологічна безпека, біологічний захист, ДСНС України, рятувальники, воєнний стан, надзвичайні ситуації, цивільний захист, професійна підготовка, підвищення кваліфікації, біологічні загрози, біотероризм, освітні програми, засоби індивідуального захисту.

Abstract. The article addresses current issues related to the advanced training of personnel of the State Emergency Service of Ukraine in the field of biological protection and biosecurity. Modern biological threats arising from the full-scale war are analyzed, including the risks associated with the spread of infectious diseases, deterioration of sanitary and epidemiological conditions in affected areas, damage to critical infrastructure, and the possible use of hazardous biological pathogenic agents. The importance of biosecurity as a significant component of national security and the need to improve the system for training specialists in this field in Ukraine are substantiated. Particular attention is paid to the role of the State Emergency Service of Ukraine in ensuring public protection under conditions of martial law, as well as to the increasing occupational risks faced by rescuers in the performance of their duties. The main directions for improving the professional training of the State Emergency Service personnel in responding to biological threats are identified. Emphasis is placed on the necessity of implementing modern advanced training programs aimed at developing practical skills in the use of modern personal protective equipment, conducting disinfection measures, containment of infection outbreaks, and interagency cooperation. Indicative topics for advanced training courses for personnel of the State Emergency Service of Ukraine in the field of biological protection and biosecurity are proposed, including theoretical, medical and biological, psychological, and practical training components. It is concluded that improving the professional training system for rescuers in the field of biosecurity is an important prerequisite for ensuring an effective response to modern challenges, preserving the life and health of personnel, and strengthening the national security of Ukraine.

Keywords: biosecurity, biological protection, the State Emergency Service of Ukraine, rescuers, martial law, emergencies, civil protection, professional training, advanced training, biological threats, bioterrorism, educational programs, personal protective equipment.

ВСТУП

Біологічна безпека є надважливою умовою благополуччя будь-якої країни і людства загалом¹. Яскравим доказом цьому служить пандемія COVID-19. Розпочавшись у 2020 р., вона швидко охопила всі країни й на сьогодні призвела до смерті понад 6 млн людей. Всього було зареєстровано понад 680 млн хворих. У значній частини перехворілих зберігаються ускладнення, які негативно впливають на їхнє здоров'я та працездатність. Пандемія одночасно нанесла колосальні збитки економіці світу та стала першопричиною різкого підвищення інфляції, зростання безробіття тощо. А ще коронавірусна хвороба показала неефективність міжнародної системи біологічної безпеки та біологічного захисту, як у цілому, так і на рівні національних систем, та потребу їх ґрунтовного вдосконалення.

Умови воєнного стану каталізують проблематику біологічної безпеки та біологічного захисту, породжують ургентну необхідність вжиття заходів, аби сформувати належну систему безпеки в цій царині. Досліджувана тематика на вістрі державної актуальності перебуває вже роки, проте все ще немає законодавчої волі, щоб швидкими кроками створити безпековий фундамент для побудови новітньої української системи біобезпеки та біозахисту².

ТЕОРЕТИЧНІ ТА НОРМАТИВНО-ПРАВОВІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БІОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА БІОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ

Окреслена тематика є предметом наукових мультидисциплінарних пошуків, зокрема правників, які вивчають різні аспекти біобезпеки та біозахисту через призму права. Серед науковців,

¹ Velychko, M. V., Radchenko, V. H. (2016). Biological safety of Ukraine: monograph. Kyiv: National. Acad. SBU [in Ukrainian].

² Сенюта І. Національні нормотворчі тенденції у сфері біологічної безпеки та біологічного захисту. Збірник наукових праць «Теорія і практика інтелектуальної власності». 2022. № 3. С. 79–88.

які аналізували правові аспекти тематики, — В. Андрейцев, Л. Даценко, В. Завгородня, Т. Коваленко, О. Кривогутова, В. Пашков, О. Піддубний, Л. Струтинська-Струк³.

Літературний огляд свідчить, що проблема біологічної безпеки та біологічного захисту в сучасних умовах розглядається науковцями як один із ключових компонентів національної безпеки держави. Значна кількість досліджень присвячена аналізу правових, організаційних, медико-біологічних та управлінських аспектів забезпечення біобезпеки, особливо в умовах глобальних епідемічних викликів та воєнних загроз. У працях М. Величка, В. Радченка, І. Гущука, Я. Гончарука та інших авторів біологічна безпека розглядається як комплексна система захисту населення, довкілля та держави від небезпечних біологічних чинників і можливих проявів біотероризму. Важливий розділ книги відведено теоретичним основам біологічної безпеки та біологічного захисту держави як складової національної безпеки. У ньому йдеться про джерела і принципи біобезпеки, методи управління ризиками, навчання та підвищення відповідної кваліфікації персоналу, міжнародні рівні вимог, організацію індикації біозагроз та їх моніторингу. Правові аспекти розвитку національної системи біобезпеки досліджували І. Сенюта, В. Сухенко та інші науковці, які акцентують увагу на необхідності вдосконалення нормативно-правового забезпечення у сфері біозахисту та формування ефективних механізмів державного реагування на біологічні загрози⁴. Питання професійної підготовки та підвищення кваліфікації фахівців у сфері цивільної безпеки висвітлені у працях В. Михайлова, М. Козяра, С. Бабушко, В. Филипчука та В. Сидоренко, де наголошується на важливості безперервної освіти, формування професійних компетентностей і практичної готовності персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях^{5,6,7,8,9}. Водночас аналіз наукових джерел показує, що питання впровадження сучасних освітніх програм з біобезпеки та біозахисту саме для рятувальників ДСНС України в умовах воєнного стану досліджено недостатньо, що зумовлює необхідність подальших наукових пошуків у цьому напрямку.

В умовах повномасштабної війни в Україні суттєво зростає роль Державної служби України з надзвичайних ситуацій у забезпеченні безпеки населення та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій воєнного характеру, як центрального органу виконавчої влади, який реалізує державну політику у сфері цивільного захисту, захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій та запобігання їх виникненню, ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, рятувальної справи, гасіння пожеж, пожежної та техногенної безпеки, діяльності аварійно-рятувальних служб, а також гідрометеорологічної діяльності^{10,11}.

³ Те ж саме [2].

⁴ Біологічна безпека та біологічний захист держави як складові національної безпеки України: навчальний посібник / І. В. Гущук, Я. М. Гончарук, М. В. Величко, М. С. Романов. Острого: Національний університет «Острозька академія», 2020. 214 с.

⁵ Михайлов В.М. Методологічні підходи до підвищення кваліфікації фахівців із питань цивільної безпеки. Збірник наукових праць «Педагогічні науки» № 94 (2021). С. 100-106.

⁶ Babushko S. R. (2015) Suchasnyi stan profesiinoho rozvytku fakhivtsiv yak skladovoi neperervnoi osvity: analiz zakonodavchoi bazy Ukrainy [Current situation with employees' professional development as a constituent of continuous education: analysis of Ukraine's legislation] Scientific Journal «ScienceRise». № 1 (7), pp. 52–57. DOI: 10.15587/2313-8416.2015.37393 [in Ukrainian]

ПКМУ від 16 грудня 2015 р. № 1052. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua>.

⁷ Kozyar, M. M. (2005) «Theoretical and methodological bases of Professional Training» experts of subunits of emergency situations». Thesis abstract of Dr. Sc. (pedag.). 13.00.04. Vinnitsa State Pedagogical University. Vinnitsa. Ukraine. (in Ukr.) [in Ukrainian].

⁸ Fylypchuk V. L. & Turovska H. I. (2017) Pidhotovka maibutnikh fakhivtsiv z tsyvilnoi bezpeky: problemy ta rishennia [Trainig future specialists civil security: problems and solutions] : URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad_2017_78_18 (data zvernennia: 01.12.2020).

⁹ Sydorenko V.V. (2017) Reformuvannia systemy pidvyshchennia kvalifikatsii kerivnykiv navchalnykh zakladiv v umovakh realizatsii kontseptsii «Nova ukrainska shkola» Reforming the system of improving the qualification of heads of educational institutions in the conditions of implementation of the concept of «New ukrainian school». Kerivnyk novoi ukrainskoi shkoly : svitohliadnoprofesiini oriientyry : zb. nauk. pr. / V.P. Andrushchenko (holova), V.P. Bekh (zast. holovy), O.V. Aleinikova ta in. Kyiv. NPU imeni M. P. Drahomanova. pp. 148-153 [in Ukrainian].

¹⁰ Державна служба України з надзвичайних ситуацій [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dsns.gov.ua/>.

¹¹ Про затвердження Положення про Державну службу України з надзвичайних ситуацій.

У своїй роботі ДСНС керується Конституцією України, яка визначає людину, її життя і здоров'я, честь, гідність, недоторканність і безпеку найвищою соціальною цінністю.

Кожен громадянин має конституційні права, зокрема:

- невід'ємне право на життя (обов'язок держави – захищати життя людини);
- право на належні, безпечні і здорові умови праці
- право на охорону здоров'я і медичну допомогу;
- право на безпечне для життя і здоров'я довкілля та відшкодування шкоди, завданої порушенням цього права;
- право на вільний доступ до інформації про стан довкілля, якість харчових продуктів і предметів побуту, а також на поширення цієї інформації, яка не може бути засекреченою. Зміст цих конституційних прав закріплено в законах України та інших нормативно-правових актах¹².

Сучасні воєнні загрози супроводжуються підвищеним ризиком виникнення біологічних небезпек, пов'язаних із руйнуванням об'єктів критичної інфраструктури, порушенням санітарно-епідеміологічного стану територій, можливістю поширення інфекційних захворювань та використанням небезпечних біологічних агентів¹³.

Водночас потребує пильної уваги проблема можливості використання активних біологічних агентів у військових цілях. Так, за аналізом із зазначеної тематики наукових публікацій, протягом останніх десяти років проведено низку активних наукових пошуків, результати яких можуть підпадати під подвійне використання країнами-розробниками зазначених біотехнологій у напрямку створення нової високоефективної біологічної зброї з метою потрібного впливу на геном людини¹⁴. Натепер біологічна зброя як засіб здійснення терористичних актів набуває все більшої актуальності. Не можна не враховувати такі особливості цієї зброї, як виняткової масовості ураження при помірних фінансових витратах та виробничих потужностей для її створення, а також можливості прихованого виробництва та застосування, перспективи як відстроченого ефекту, так і надзвичайно швидкої дії біологічної зброї. З одного боку, низька вартість розробок та можливість створення біологічної зброї, у тому числі й для її військового використання, силами однієї невеликої лабораторії з 2-3 висококваліфікованих фахівців-біотехнологів робить організацію процесу економічно вигідним. На «вигідність» впливає й те, що облаштування та забезпечення функціонування біотехнологічної лабораторії не потребує ні великих площ, ні важкодоступних речовин та матеріалів, ні специфічного обладнання, яке перебуває на державному обліку. Цим біотехнологічна лабораторія відрізняється, наприклад, від ядерної лабораторії, яка потребує і важкодоступні речовини та матеріали, і специфічного обладнання, яке знаходиться під суворим державним контролем¹⁵. Більш того, біотехнологічна лабораторія, в якій в деструктивних цілях створюються нові організми, легко може бути замаскована під одну з численних лабораторій, зайняту медичними дослідженнями мирного профілю¹⁶.

¹² Державна служба України з надзвичайних ситуацій [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dsns.gov.ua/>.

¹³ Про затвердження Положення про Державну службу України з надзвичайних ситуацій. ПКМУ від 16 грудня 2015 р. № 1052. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua>.

¹⁴ Біологічна безпека та біологічний захист держави як складові національної безпеки України: навчальний посібник / І. В. Гушук, Я. М. Гончарук, М. В. Величко, М. С. Романов. Острог: Національний університет «Острозька академія», 2020. 214 с.

¹⁵ Захарін В. В., Сухенко В. В., Стасюк А. Г. Розвиток біотехнологій та питання біобезпеки. Державне управління: удосконалення та розвиток. 2023. URL : <https://www.nauka.com.ua/index.php/dy>.

¹⁶ Кравчук М. Ю. Біотероризм у системі доктринальних положень та перспективи протидії йому на законодавчому рівні. Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: «Право». Ужгород. 2019. Вип. 58. Том 2. С. 42-45.

А з іншого боку, ефект від застосування біологічної зброї є величезним. Так, наприклад, один грам біологічної речовини може містити від одного до ста квінтильйонів активних молекул патогену, які, потрапивши в живий організм, будуть розмножуватися, вивільнятися і заражати інших.

Щодо застосування біологічної зброї у військових цілях та вибору типу хвороботворних мікроорганізмів, то вирішальним фактором тут є її бажана вірулентність, тобто спосіб передачі та тяжкість лікування захворювання або бажана летальність.

Особливо небезпечним може бути груповий та індивідуальний тероризм із застосуванням біологічної зброї¹⁷.

Біотероризм – це міжнародний злочин, який перебуває в умисній дії або бездіяльності щодо вивільнення, розсіювання або розповсюдження біологічних агентів та токсинів, внаслідок чого завдається шкода життю та здоров'ю людей, тварин, рослин або створюється загроза заподіяння такої шкоди з метою залякування населення, порушення суспільної безпеки та впливу на прийняття рішень органами публічної та державної влади, а також міжнародними організаціями¹⁸.

У мирні часи діяльність Державної служби з надзвичайних ситуацій (ДСНС) була спрямована на захист населення від надзвичайних ситуацій, в основному, техногенного та природного походження, тому що кількість НС іншого характеру була незначною. Підрозділи ДСНС працювали в режимі повсякденної діяльності, а в разі істотного погіршення обстановки, чи в умовах виникнення НС – відповідно в режимах підвищеної готовності чи надзвичайної ситуації. Все змінилось, коли 24 лютого 2022 року країну було переведено на воєнні рейки внаслідок вторгнення російської федерації, і настав той самий особливий час, про який йшлося у визначенні поняття цивільного захисту у статті 4 Кодексу Цивільного захисту¹⁹. Поряд з військами підрозділи ДСНС почали боронити країну від надзвичайних ситуацій, спричинених війною, тільки на відміну від звичайної зброї вони використовували інженерну та пожежно-рятувальну техніку.

Робота ДСНС в умовах повномасштабної війни вимагає якісно вищого технічного оснащення рятувальних команд, збільшення кількості засобів та обладнання, а також підвищення кваліфікації фахівців і нових підходів до організації діяльності служби особливо в розрізі забезпечення біобезпеки та біозахисту.

Зростає потреба в удосконалених методах і підвищенні рівня спеціалізації, які дозволили б впоратися з цими новими викликами.

Актуальність теми зумовлена сучасними умовами війни, в яких рятувальники ДСНС України дедалі частіше стають безпосередніми цілями ворожих атак під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Останнім часом фіксуються численні випадки прицільних ударів по рятувальних підрозділах, об'єктах цивільного захисту та місцях проведення аварійно-рятувальних робіт. За таких обставин не можна виключати ризик застосування проти особового складу різних видів озброєння, зокрема із використанням небезпечних агентів та засобів ураження біологічного характеру.

Забезпечення біобезпеки та біозахисту рятувальників має ключове значення для збереження їхнього здоров'я як у поточній діяльності, так і в довгостроковій перспективі. Під час виконання аварійно-рятувальних робіт в умовах війни особовий склад ДСНС постійно зазнає впливу потенційно небезпечних біологічних факторів, що можуть призводити до інфекційних захворювань, ускладнень стану здоров'я та професійних ризиків. Найбільш поширеними в Україні є захворювання від впливу пилу: пневмоконіози, хронічні бронхіти, хронічні обструктивні

¹⁷ Біологічна безпека України : монографія / за заг. ред. М. В. Величка, В. Г. Радченка. – Київ : Нац. акад. СБУ, 2016. – 784 с.

¹⁸ Бакалюк О. Й. Безпека людини у третьому тисячолітті: біотероризм. Безпека життєдіяльності. 2012. № 8. С. 30-34.

¹⁹ Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua>.

захворювання легень (ХОЗЛ), що формують 38,7% у структурі професійної захворюваності. За даними наукових досліджень та ресурсу GBD, у якому DALYs від впливу професійних чинників аналізуються за факторами ризику, найчастішими етіологічними чинниками серед них є: ергономічні, шум, пил, речовини, що викликають астму, канцерогени, тверді частки, гази, дими²⁰.

Це створює додаткові загрози для життя та здоров'я рятувальників і вимагає суттєвого підвищення рівня їх професійної готовності до дій в умовах можливого біологічного зараження. Саме тому впровадження сучасних освітніх програм з біобезпеки та біозахисту, спрямованих на формування практичних навичок реагування на біологічні загрози, використання засобів індивідуального захисту та проведення спеціальної обробки, є важливою складовою системи підвищення кваліфікації рятувальників ДСНС в умовах війни.

Ефективне виконання службових завдань рятувальниками в умовах біологічних загроз потребує не лише належного матеріально-технічного забезпечення, а й високого рівня професійної підготовки.

У сучасних динамічних умовах розвитку нових технологій фахівець будь-якої сфери діяльності не може упродовж тривалого часу обходитися тією кваліфікацією, якої він набув. Існує твердження, що знань, отриманих фахівцем протягом періоду навчання в закладі вищої освіти, недостатньо, щоб бути конкурентоспроможним та успішним в суспільстві, що швидко змінюється. У зв'язку з коротким життєвим циклом професійні знання уміння та навички повинні постійно оновлюватися, тому важливо підтримувати і підвищувати рівень освіти фахівців, продовжуючи процес навчання, роблячи його безперервним^{21,22,23,24,25}. Підвищення кваліфікації фахівців, які забезпечують виконання завдань із питань цивільної безпеки в певній сфері суспільного життя, сьогодні стає важливою проблемою. Ефективна діяльність можлива лише за умови повноцінної підготовленості фахівців із питань цивільної безпеки до дії в умовах надзвичайних ситуацій, які для них мають бути звичною нормою²⁶. Суспільству потрібні висококваліфіковані фахівці, здатні розробляти та реалізовувати організаційно-технічні заходи забезпечення безпеки людини; проводити моніторинг і прогнозування надзвичайних ситуацій на підставі отриманих даних; організовувати координацію дій органів управління і сил цивільного захисту; забезпечувати ефективну діяльність підпорядкованих структур відповідно до їх повноважень; формувати інноваційні підходи для прийняття управлінських рішень, що впливають на рівень безпеки людини. Вимоги суспільства до фахівця постійно змінюються, і зайняти гідне місце у фаховій спільноті можливо лише за умов постійного розвитку власного потенціалу²⁷.

У науковій літературі, зазвичай, підвищення кваліфікації трактують як післявузівську або післядипломну освіту, що передбачає оновлення знань та збагачення досвіду фахівців з урахуванням нових досягнень педагогіки, а також перспектив її розвитку. Як навчальна діяльність підвищення кваліфікації спрямоване на засвоєння нових загальнотеоретичних і спеціально-технологічних знань, розширення спектра умінь, поглиблення зв'язку між наукою і технологією, на

²⁰ Проданчук М. Г., Басанець А. В., Кравчук О. П., Гашинова К. Ю., Гвоздецький В. А. Аналіз динаміки професійної захворюваності та її наслідків в Україні порівняно з країнами світу // Медичні перспективи. 2023. Т. 28, № 3. С. 137–152. DOI: <https://doi.org/10.26641/2307-0404.2023.3.289217>.

²¹ Те ж саме [5].

²² Те ж саме [6].

²³ Те ж саме [7].

²⁴ Те ж саме [8].

²⁵ Те ж саме [9].

²⁶ Те ж саме [7].

²⁷ Те ж саме [7].

формування готовності фахівця до виконання більш складних завдань^{28,29}. Професійна підготовка фахівців з різних напрямків галузі безпеки людини розглядається як неперервне системно-функціональне психолого-педагогічне явище, цілеспрямований процес оволодіння професійно орієнтованими можливостями, які визначають професійний розвиток, готовність до адекватних дій у надзвичайних ситуаціях. Основним призначенням підвищення кваліфікації фахівців із питань цивільної безпеки, на наш погляд, є піднесення підготовки на якісно новий рівень, що забезпечує вдосконалення професійно-особистісного розвитку; освоєння нових способів вирішення професійних завдань; здатність оперативно реагувати на потреби людей задля забезпечення їх безпечної життєдіяльності. Ефективна організація підвищення кваліфікації фахівців, наповнена новим змістом, результативністю використовуваних андрагогічних методів, технологій, неперервністю курсового і міжкурсівного періодів як цілісного андрагогічного циклу, є не тільки вимогою часу, а передусім визначальним показником діяльності інституцій післядипломної освіти^{30,31}. Формування професійної компетентності фахівців при вивченні дисциплін з безпекового напрямку дедалі серйозніше лунає в організації навчального процесу різноманітних закладів освіти країни, що відбувається за умови використання принципів наступності та неперервності навчання. Сьогодні підготовка фахівців із питань цивільної безпеки є складовою загальнодержавної системи освіти і включає в себе, зокрема, мережу закладів вищої освіти державної та приватної форми власності, закладів вищої освіти із специфічними умовами навчання, навчально-методичних установ сфери цивільного захисту.

Важливим напрямом удосконалення системи підготовки кадрів є впровадження сучасних освітніх програм, орієнтованих на формування практичних навичок реагування на надзвичайні ситуації біологічного характеру, використання засобів індивідуального захисту, проведення дезінфекційних заходів та міжвідомчої взаємодії.

Сучасні освітні програми мають враховувати новітні виклики воєнного часу, міжнародний досвід у сфері біобезпеки та необхідність постійного оновлення професійних компетентностей особового складу. Особливого значення набуває проведення спеціалізованих тренінгів, практичних занять і моделювання надзвичайних ситуацій, що дозволяє максимально наблизити процес навчання до реальних умов виконання службових завдань. Особлива увага має приділятися формуванню у рятувальників практичних навичок використання засобів індивідуального захисту, дотримання санітарно-епідеміологічних вимог, алгоритмів дій у разі виявлення біологічних загроз, а також проведення дезінфекційних заходів.

Таким чином, підвищення кваліфікації рятувальників ДСНС шляхом впровадження сучасних освітніх програм з біобезпеки та біозахисту є важливою складовою забезпечення професійної готовності особового складу, збереження життя і здоров'я рятувальників та ефективного реагування на сучасні виклики в умовах війни.

НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ РЯТУВАЛЬНИКІВ ДСНС У СФЕРІ БІОБЕЗПЕКИ ТА БІОЗАХИСТУ

Важливим напрямом є підвищення кваліфікації особового складу в умовах воєнного стану через проведення спеціалізованих курсів, навчань і тренінгів із залученням фахівців у сфері медицини, епідеміології та цивільного захисту. Це сприятиме підвищенню рівня готовності

²⁸ Те ж саме [5].

²⁹ Те ж саме [4].

³⁰ Те ж саме [5].

³¹ Те ж саме [9].

РОЗДІЛ 3. БЕЗПЕКА, УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ТА РІШЕННЯ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

рятувальників до дій у надзвичайних ситуаціях біологічного характеру та мінімізації ризиків для їхнього життя і здоров'я.

Нами пропонується включати в зміст сучасних освітніх програм підвищення кваліфікації співробітників ДСНС України тематики з біологічної безпеки і біологічного захисту, що наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Орієнтовна тематика вивчення питань біологічної безпеки і біологічного захисту в розрізі курсів підвищення кваліфікації співробітників ДСНС України

№ 1	Напрямок 2	Основний зміст 3	Важливість для рятувальників ДСНС 4
1	Основи біобезпеки та біозахисту	Вивчення біологічних загроз, небезпечних агентів, принципів біозахисту	Формує базові знання щодо безпечної роботи в умовах біологічної небезпеки
2	Дії рятувальників у разі біологічних загроз	Алгоритми реагування, локалізація осередків зараження, евакуація населення	Підвищує готовність до оперативних дій у надзвичайних ситуаціях
3	Використання засобів індивідуального захисту	Правила використання захисних костюмів, респіраторів, рукавичок	Знижує ризик зараження та забезпечує захист життя і здоров'я рятувальників
4	Санітарна та спеціальна обробка	Проведення дезінфекції, деконтамінації техніки, спорядження і територій	Запобігає поширенню небезпечних інфекцій та біологічних агентів
5	Медико-біологічна підготовка	Перша допомога, профілактика інфекцій, ознаки біологічного ураження	Допомагає своєчасно надавати допомогу постраждалим та захищати особовий склад
6	Психологічна підготовка в умовах біологічних загроз	Стресостійкість, психологічна підтримка, робота в кризових умовах	Підвищує психологічну витривалість та ефективність роботи рятувальників
7	Міжвідомча взаємодія у сфері біобезпеки	Координація дій із медичними службами, військовими та органами влади	Забезпечує ефективну взаємодію під час ліквідації наслідків біологічних загроз
8	Практичні тренінги та моделювання НС	Проведення навчань і відпрацювання дій у змодельованих умовах зараження	Формує практичні навички реагування в реальних умовах війни

ВИСНОВКИ

У сучасних умовах, коли Україна інтегрується в світовий освітній, науковий і економічний простір, спостерігаються значущі зміни в законодавчій базі, що стосується розвитку вітчизняної освіти. Ці зміни обумовлені впровадженням нових технологій, обладнання, механізмів взаємодії, забезпечення, управління та інших аспектів діяльності, які постійно відзначаються змінами вимог до рівня підготовки працівників і фахівців. Модернізація системи підготовки кадрів для потреб системи цивільного захисту можлива лише в рамках загальної реформи вищої освіти, що відбувається в системі управління якістю, частиною якої є освітні стандарти. Зосередження уваги на проблемах управління галузевою стандартизацією визначене складністю вирішення проблеми якості вищої освіти і необхідністю приведення національного законодавства у цій сфері у відповідність до кращих світових стандартів.

Особливо значущою ця підготовка стала для України у сучасному контексті: збройна агресія, застосування хімічної зброї, техногенні аварії та загрози, використання зброї масового ураження.

Забезпечення національної безпеки вимагає висококваліфікованих кадрів РХБ-захисту, здатних діяти в умовах таких загроз³².

Фахівці сил безпеки у сфері РХБ-захисту (військовослужбовці військ РХБ-захисту, фахівці ДСНС, Національної гвардії, прикордонної служби тощо) потребують спеціалізованої підготовки, особливо в розрізі реагування на біологічні ризики, яка традиційно поєднує ґрунтовні теоретичні знання з інтенсивними практичними тренуваннями на полігонах і в лабораторіях. Радіаційний, хімічний, біологічний захист як вид бойового та аварійно-рятувального забезпечення включає навчання реагуванню на ядерно-радіаційні інциденти, хімічні атаки чи викиди, біологічні загрози і застосування засобів індивідуального захисту та деконтамінації. У міжнародній термінології вживається абревіатура CBRN (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear) – в українському контексті часто еквівалентом є РХБ-захист (який охоплює також ядерно-радіаційні загрози).

Таким чином, система професійної підготовки рятувальників ДСНС з питань біобезпеки та біозахисту в умовах воєнного стану є важливою складовою національної безпеки та ефективного функціонування системи цивільного захисту. Її вдосконалення повинно бути одним із пріоритетних напрямів розвитку системи підготовки кадрів ДСНС України.

Воєнний стан вимагає ретельного вивчення та впровадження специфічних стратегій та підходів до управління, спрямованих на забезпечення безпеки, захисту населення та управлінської відповідальності.

Ефективність системи біобезпеки та біозахисту з протидії загрозам біологічного характеру прямо залежна від наявності висококваліфікованих фахівців у даній сфері, на яких покладено відповідний контроль за персоналом, що працює з небезпечними біологічними агентами.

³² Holiardyk N., Nevko O. Дистанційне навчання в умовах війни: виклики та можливості для системи вищої освіти України. Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: педагогічні науки. 2023. Т. 34, № 3. С. 57–72.

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ПОЖЕЖНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ОБ'ЄКТИ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ ПІВДНЯ УКРАЇНИ У ВОЄННИЙ ПЕРІОД

REMOTE MONITORING OF FIRE LOAD ON PROTECTED AREAS OF SOUTHERN UKRAINE DURING WARTIME

Магась Наталія Іванівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, nataly.magas@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2579-1465>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.23>

Анотація. Дослідження присвячене кількісній оцінці пожежного навантаження на об'єкти природно-заповідного фонду півдня України у воєнний період із використанням даних дистанційного зондування Землі. Метою роботи є визначення просторово-часових змін пожежної активності, площі та тяжкості вигорання на 14 ключових природоохоронних територіях у 2022–2025 рр. порівняно з довоєнним періодом 2019–2021 рр. Методологія ґрунтується на інтеграції даних активних вогнищ NASA FIRMS VIIRS та індексу dNBR, розрахованого за мультиспектральними знімками Sentinel-2. Для зменшення впливу сезонної сенесценції степової рослинності та інших хибнопозитивних спектральних змін застосовано FIRMS-верифікацію dNBR-площ. Окремо проаналізовано співвідношення між загальною dNBR-визначеною площею та FIRMS-верифікованою площею вигорання, що дозволило оцінити ступінь відповідності спектрального сигналу фактам активного горіння. Установлено посилення пожежного навантаження насамперед для територій, пов'язаних із бойовими діями, тимчасовою окупацією або обмеженням доступу. Найбільші прирости FIRMS-верифікованої площі вигорання зафіксовано для Нижньодніпровського національного природного парку, біосферного заповідника «Асканія-Нова», Чорноморського біосферного заповідника та регіонального ландшафтного парку «Кінбурнська коса». Запропонований підхід є придатним для попередньої оцінки воєнних екологічних збитків, планування польових обстежень після деокупації та моніторингу важкодоступних природоохоронних територій України.

Ключові слова: пожежне навантаження; природно-заповідний фонд; дистанційне зондування Землі; FIRMS; dNBR; воєнний вплив на довкілля; степові екосистеми; південь України.

Abstract. The study provides a quantitative assessment of fire pressure on protected areas in southern Ukraine during wartime using remote sensing data. The aim is to evaluate spatial and temporal changes in fire activity, burned area and burn severity across 14 key protected areas in 2022–2025 compared with the pre-war baseline of 2019–2021. The methodology integrates NASA FIRMS VIIRS active fire detections with the differenced Normalized Burn Ratio derived from Sentinel-2 multispectral imagery. To reduce the influence of seasonal senescence in steppe vegetation and other false-positive spectral changes, dNBR-derived burned areas were verified using FIRMS-based spatial masks. The relationship between the total dNBR-derived area and the FIRMS-verified burned area was additionally analysed to assess the consistency between spectral disturbance and active fire detections. The results indicate an increase in fire pressure

primarily for protected areas affected by military operations, temporary occupation or restricted access. The largest increases in FIRMS-verified burned area were recorded for Nyzhnodniprovskiy National Nature Park, Askania-Nova Biosphere Reserve, Chornomorskyi Biosphere Reserve and Kinburnska Kosa Regional Landscape Park. The proposed approach is suitable for preliminary assessment of wartime environmental damage, planning post-deoccupation field verification and monitoring inaccessible protected areas in Ukraine.

Keywords: fire pressure; protected areas; remote sensing; FIRMS; dNBR; wartime environmental impact; steppe ecosystems; southern Ukraine.

1. ВСТУП

Природно-заповідний фонд півдня України охоплює значні за площею степові, прибережні, заплавні та водно-болотні екосистеми, частина яких має міжнародний охоронний статус у межах Смарагдової мережі, Рамсарської конвенції та програми UNESCO-MAB. Після початку повномасштабної війни ці території зазнали поєднаного впливу бойових дій, мінування, обмеження доступу, руйнування інфраструктури та неможливості оперативного реагування на пожежі. У таких умовах пожежі стають одним із ключових чинників трансформації природних екосистем, а їх моніторинг потребує методів, придатних для роботи з окупованими, замінованими та іншими важкодоступними територіями.

Дистанційне зондування Землі забезпечує просторово повну, повторювану та відтворювану основу для оцінки пожежного навантаження. Дані активних вогнищ NASA FIRMS VIIRS фіксують термальні аномалії та дають змогу оцінювати просторово-часову активність горіння, тоді як знімки Sentinel-2 L2A дозволяють розраховувати спектральні індекси пошкодження рослинного покриву, зокрема NBR і dNBR. Разом із тим пряме застосування dNBR у степових ландшафтах має методичні обмеження: сезонне висихання трав'яної рослинності, оголення ґрунту або зміна вологості поверхні можуть формувати сигнал, подібний до післяпожежного ураження¹.

У міжнародній практиці dNBR, RdNBR і споріднені індекси широко використовуються для картографування площі та тяжкості пожежного ураження, однак їх інтерпретація залежить від типу рослинності, сезону знімання, передпожежного стану фітомаси та наявності наземної або незалежної дистанційної верифікації. Для дослідження воєнного впливу на природоохоронні території України особливо важливо поєднувати спектральні індикатори з даними активного горіння, оскільки наземний контроль на окупованих або замінованих ділянках часто неможливий, а екологічні наслідки війни мають комплексний і просторово неоднорідний характер².

Сучасні оглядові та прикладні дослідження підтверджують, що картографування згарищ і оцінка тяжкості пожежного ураження дедалі частіше ґрунтуються на поєднанні оптичних і SWIR-каналів Sentinel-2, часових композитів, індексів NBR/dNBR/RdNBR та алгоритмів автоматизованого дешифрування. Водночас у працях останніх років наголошується, що універсальні порогові значення dNBR не завжди коректно переносяться між лісовими, степовими, напіваридними та прибережними

¹ NASA FIRMS. VIIRS active fire and thermal anomalies: Fire Information for Resource Management System. NASA, 2026. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/> (дата звернення: 15.05.2026); Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csiszar I. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 143. P. 85–96. DOI: 10.1016/j.rse.2013.12.008.

² Key C. H., Benson N. C. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service, 2006; Miller J. D., Thode A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio. *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 109(1). P. 66–80. DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.006; Parks S. A., Dillon G. K., Miller C. A new metric for quantifying burn severity: The relativized burn ratio. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6(3). P. 1827–1844. DOI: 10.3390/rs6031827.

екосистемами, оскільки спектральний сигнал залежить від структури рослинності, вологості ґрунту, передпожежної біомаси, сезону знімання та швидкості післяпожежного відновлення. Отже, для природоохоронних територій півдня України доцільним є не ізольоване використання dNBR, а його просторове обмеження незалежними даними активного горіння³.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із впливом війни та збройних конфліктів на пожежні режими. Роботи, виконані для України та інших конфліктних регіонів, показують, що бойові дії можуть змінювати просторову структуру й сезонність пожеж через додаткові джерела займання, неможливість оперативного гасіння, мінну небезпеку, обмеження доступу та накопичення горючої біомаси. Для природно-заповідного фонду це означає, що пожежне навантаження у воєнний період слід розглядати не лише як природно-кліматичне явище, а як результат взаємодії природної пожежної небезпеки, режиму землекористування та воєнного статусу території⁴.

Метою дослідження є кількісна оцінка пожежного навантаження на ключові об'єкти природно-заповідного фонду півдня України у воєнний період 2022–2025 рр. порівняно з довоєнним базовим періодом 2019–2021 рр. на основі інтеграції даних NASA FIRMS VIIRS та Sentinel-2 dNBR. Для досягнення мети сформовано базу активних вогнищ, виконано просторове поєднання термоточок із межами природоохоронних територій, розраховано площі та класи тяжкості вигорання, застосовано FIRMS-верифікацію dNBR-площ і проведено статистичне порівняння довоєнного та воєнного періодів.

Об'єктом дослідження є пожежне навантаження на об'єкти природно-заповідного фонду півдня України в умовах воєнного впливу. Предметом дослідження є просторово-часові зміни активних вогнищ, площі та тяжкості вигорання, а також FIRMS-верифікованих dNBR-площ у довоєнний і воєнний періоди.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Загальна схема дослідження

Дослідження побудовано як порівняльний просторово-часовий аналіз пожежного навантаження у двох часових інтервалах: 2019–2021 рр., що прийнято як довоєнний базовий період, та 2022–2025 рр., що відображає умови повномасштабної війни. Одиницею детального аналізу був окремий об'єкт природно-заповідного фонду, для якого розраховувалися річні та періодичні показники кількості активних вогнищ, теплової інтенсивності пожеж, площі FIRMS-верифікованого вигорання та структури класів тяжкості пошкодження рослинного покриву.

Аналітична схема дослідження (рис. 1) репрезентує послідовність фактично виконаних операцій і поєднує п'ять взаємопов'язаних етапів: формування та фільтрацію бази активних вогнищ

³ Guiop-Servan R. E., Cotrina-Sanchez A., Puerta-Culqui J., Oliva-Cruz M., Barboza E. Remote Sensing for Wildfire Mapping: A Comprehensive Review of Advances, Platforms, and Algorithms. *Fire*. 2025. Vol. 8(8). Article 316. DOI: 10.3390/fire8080316; Gupta P., Shukla A. K., Shukla D. P. Sentinel-2 based burn severity mapping and assessing post-fire impacts on forests and buildings in the Mizoram, a north-eastern Himalayan region. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. Vol. 36. Article 101279. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101279; Llorens R., Sobrino J. A., Fernández C., Fernández-Alonso J. M., Vega J. A. Soil Burn Severity Assessment Using Sentinel-2 and Radiometric Measurements. *Fire*. 2024. Vol. 7(12). Article 487. DOI: 10.3390/fire7120487; Al-hasn R., Almuhammad R. Burned area determination using Sentinel-2 satellite images and the impact of fire on the availability of soil nutrients in Syria. *Journal of Forest Science*. 2022. Vol. 68(3). P. 96–106. DOI: 10.17221/122/2021-JFS; Chen L., Wei B., Jia X., Liu M., Zhao Y. Burned Area Mapping and Fire Severity Assessment of Forest–Grassland Ecosystems Using Time-Series Landsat Imagery (1985–2023): A Case Study of Daxing'anling Region, China. *Fire*. 2025. Vol. 8(9). Article 337. DOI: 10.3390/fire8090337.

⁴ Rodriguez-Jimenez F., Novo A., Hall J. V. Influence of wildfires on the conflict (2006–2022) in eastern Ukraine using remote sensing techniques (MODIS and Sentinel-2 images). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. Vol. 35. Article 101240. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101240; Kganyago M., Tshigoli P., Shikwambana L. Geospatial analysis of the fire incidents and burned areas induced by Russia-Ukraine war in 2022 using MODIS and VIIRS data. *Applied Geomatics*. 2025. Vol. 17. P. 519–533. DOI: 10.1007/s12518-025-00634-6; Matsala M., Odruzhenko A., Hinchuk T. et al. War drives forest fire risks and highlights the need for more ecologically-sound forest management in post-war Ukraine. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 4131. DOI: 10.1038/s41598-024-54811-5.

NASA FIRMS VIIRS; просторове поєднання термоточок із межами об'єктів природно-заповідного фонду; розрахунок NBR і dNBR за знімками Sentinel-2 у Google Earth Engine; FIRMS-верифікацію dNBR-площ для відсіювання хибнопозитивних змін рослинності; статистичне узагальнення та картографічне подання результатів. Така послідовність забезпечує перехід від реєстрації факту активного горіння до оцінки площі, тяжкості та просторової диференціації пожежного впливу на об'єкти ПЗФ.⁵

Усі аналітичні операції виконано авторкою спеціально для цього дослідження. Робочі алгоритми обробки, проміжні таблиці та картографічні заготовки розглядалися як технічні інструменти обробки даних, а не як самостійні джерела. Тому в тексті описано методичний зміст виконаних процедур: підготовку бази активних вогнищ, просторове накладання на межі об'єктів природно-заповідного фонду, розрахунок NBR і dNBR, формування FIRMS-маски активного горіння, статистичну агрегацію та картографічне узагальнення результатів.

У межах цієї схеми FIRMS-блок забезпечив розрахунок річної кількості термоточок, показників FRP та кількості пожежних днів; Sentinel-2-блок — оцінку спектрального пошкодження рослинного покриву; блок верифікації — відбір тих dNBR-пікселів, які просторово збігалися із зоною активного горіння. Отриманий показник FIRMS-верифікованої площі вигорання використано як основний результативний індикатор, оскільки він поєднує інформацію про факт пожежі та просторову площу післяпожежного пошкодження.

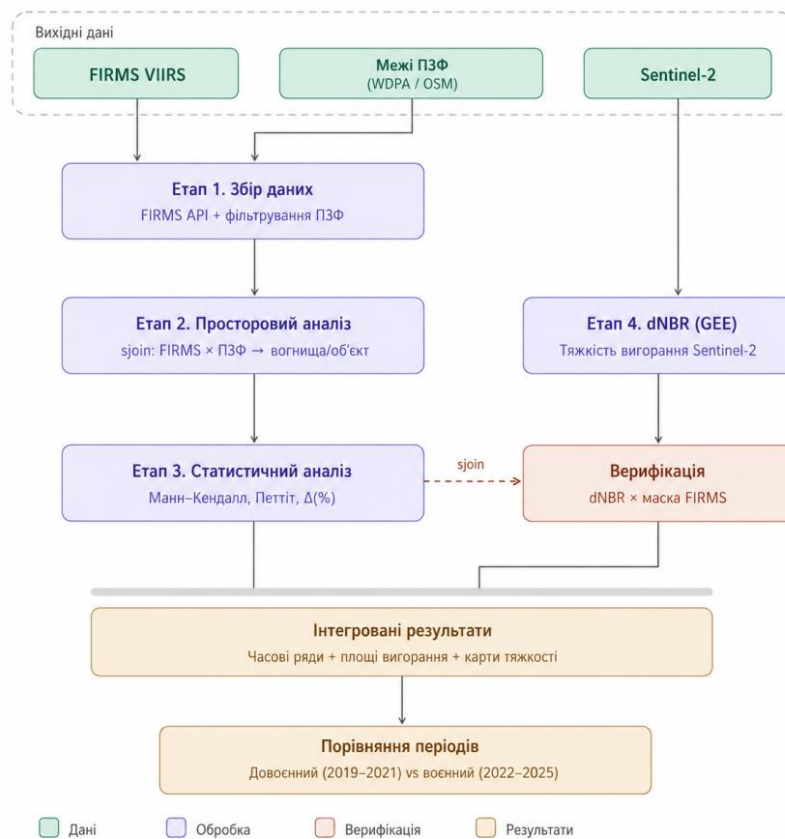


Рисунок 1. Загальна аналітична схема дослідження пожежного навантаження на об'єкти природно-заповідного фонду
Джерело: власна розробка авторки.

⁵ Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

2.2. Район дослідження та об'єкти природно-заповідного фонду

Район дослідження охоплює Миколаївську, Херсонську, Запорізьку та Одеську області. Для детального аналізу відібрано 14 ключових об'єктів природно-заповідного фонду, які репрезентують різні природоохоронні категорії, екосистемні типи та умови воєнного впливу. До вибірки включено біосферні заповідники, національні природні парки, регіональні ландшафтні парки і природний заповідник.

Відбір об'єктів здійснювався з урахуванням площі, природоохоронної значущості, наявності степових, заплавних, прибережних або водно-болотних екосистем, а також статусу території у 2022–2025 рр. Такий підхід дав змогу порівняти території, що перебували у зоні бойових дій, тимчасовій окупації, прифронтовій зоні або на підконтрольній території. Воєнний статус розглядався не як формальний адміністративний показник, а як інтерпретаційна ознака, що відображає можливість доступу, гасіння пожеж і проведення наземної перевірки; структура вибірки за категоріями, площею, екосистемним типом і доступністю деталізує цей підхід (табл. 1), а просторовий розподіл об'єктів показує їх прив'язку до основних зон воєнного впливу на півдні України (рис. 2).

Таблиця 1

Об'єкти природно-заповідного фонду, включені до дослідження

Об'єкт	Категорія	Площа, га	Переважаючий тип екосистем	Воєнний статус / доступність
Чорноморський	БЗ	89 129	прибережні та водно-болотні комплекси	тимчасово окупований, висока бойова активність
Нижньодніпровський	НПП	80 180	запlavно-дельтові комплекси нижнього Дніпра	прифронтовий / зона бойових дій
Приазовський	НПП	78 127	прибережні комплекси Азовського моря	тимчасово окупований, тиловий
Білобережжя Святослава	НПП	35 223	піщані, лісові та прибережні біотопи	тимчасово окупований, висока бойова активність
Асканія-Нова	БЗ	33 308	цілинний степ	тимчасово окупований, тиловий
Тилігульський	РЛП	21 236	лиманні, степові та прибережні біотопи	підконтрольний
Кінбурнська коса	РЛП	17 892	піщано-лісові та прибережні біотопи	тимчасово окупований, висока бойова активність
Великий Луг	НПП	16 756	запlavні комплекси Дніпра	тимчасово окупований, висока бойова активність
Кам'янська Січ	НПП	12 261	степові та прибережні комплекси колишнього Каховського водосховища	прифронтовий / зона бойових дій
Олешківські піски	НПП	11 667	піщані арили та соснові насадження	тимчасово окупований, висока бойова активність
Джарилгацький	НПП	10 300	острівні та прибережні комплекси	тимчасово окупований, тиловий
Бузький Гард	НПП	6 140	каньйонно-степові комплекси Південного Бугу	підконтрольний
Приінгульський	РЛП	3 153	степові та запlavні комплекси	підконтрольний
Сланецький степ	ПЗ	3 010	цілинний степ	підконтрольний

Джерело: узагальнено авторкою за відкритими геопросторовими даними.

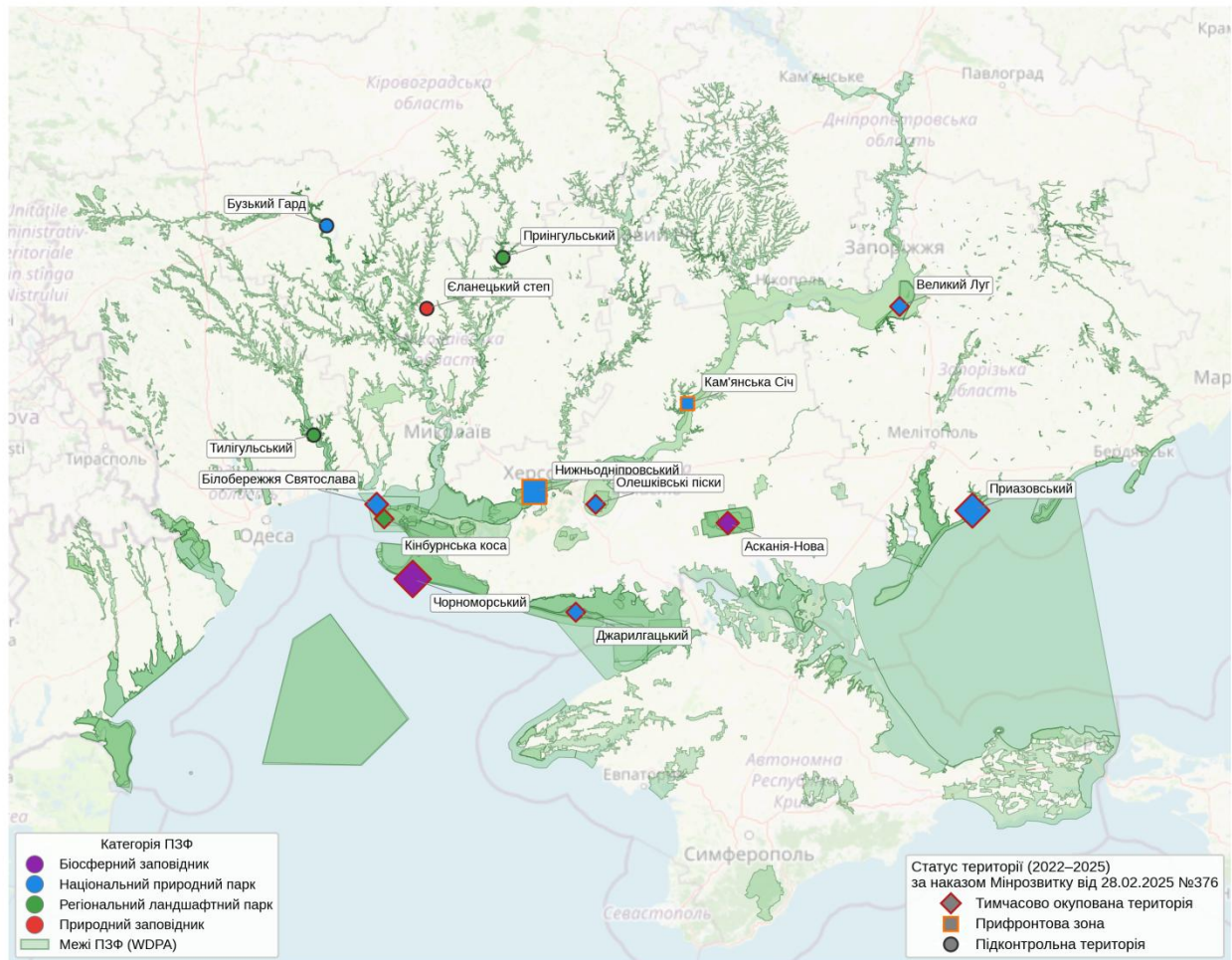


Рисунок 2. Розташування ключових об'єктів природно-заповідного фонду півдня України та їх воєнний статус у 2022–2025 рр.

Джерело: побудовано авторкою за відкритими геопросторовими даними.

2.3. Вихідні дані

Вихідними даними слугували відкриті супутникові та геопросторові набори. Дані NASA FIRMS VIIRS використовувалися для ідентифікації активних вогнищ і розрахунку характеристик інтенсивності горіння; вони містять координати термальних аномалій, час спостереження, яскравісну температуру, рівень достовірності та FRP. Дані Sentinel-2 L2A застосовувалися для розрахунку NBR і dNBR на основі поверхневої відбивної здатності. Межі об'єктів природно-заповідного фонду отримано з WDPA та OpenStreetMap, а для виключення постійних водних поверхонь використано JRC Global Surface Water.⁶⁷

⁶ European Space Agency. Sentinel-2 User Handbook. ESA Standard Document. Issue 1, Rev. 2. 2015. URL: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook (дата звернення: 15.05.2026); Copernicus. Sentinel-2 Collection 1 MSI Level-2A (L2A). Copernicus Sentinel Online, 2026. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/sentinel-data-access/sentinel-products/sentinel-2-data-products/collection-1-level-2a> (дата звернення: 15.05.2026).

⁷ World Database on Protected Areas (WDPA). Protected Planet: The World Database on Protected Areas. UNEP-WCMC and IUCN, 2026. URL: <https://www.protectedplanet.net/> (дата звернення: 15.05.2026); OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap database. 2026. URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата звернення: 15.05.2026); Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature. 2016. Vol. 540. P. 418–422. DOI: 10.1038/nature20584; European Commission Joint Research Centre. Global Surface Water Explorer, v1.4. 2026. URL: <https://global-surface-water.appspot.com/> (дата звернення: 15.05.2026).

Перед статистичною та картографічною агрегацією всі набори було приведено до єдиної логіки просторового аналізу. Межі об'єктів ПЗФ використовувалися як маски обробки; FIRMS-точки — як незалежний індикатор активного горіння; Sentinel-2 L2A — як основа для спектральної оцінки пошкодження рослинності; JRC Global Surface Water — як допоміжний шар для виключення постійних водних поверхонь із розрахунків dNBR. Така попередня уніфікація дала змогу зіставляти показники між об'єктами різної площі, екосистемного типу та воєнного статусу, а перелік джерел даних і змінних аналізу фіксує інформаційну основу подальших розрахунків (табл. 2).

Таблиця 2

Основні джерела даних і змінні аналізу

Джерело даних	Період / просторове охоплення	Призначення	Основні змінні
NASA FIRMS VIIRS S-NPP	2019–2025; активні термоточки	виявлення активного горіння та оцінка інтенсивності	дата, координати, bright_ti4, confidence, FRP, тип детекції
Sentinel-2 L2A	2019–2025; мультиспектральні знімки	розрахунок NBR, dNBR, площі і класів тяжкості вигорання	B8A, B12, NBRpre, NBRpost, dNBR
WDPA / OpenStreetMap	межі об'єктів ПЗФ	просторове обмеження аналізу та прив'язка пожеж до об'єктів	полігон, назва, площа, категорія
JRC Global Surface Water v1.4	глобальний шар водних поверхонь	маскування постійної води	occurrence, water mask
Підсумкові авторські таблиці	2019–2025; 14 об'єктів	статистична агрегація та візуалізація	n_fires, FRP, burned_ha, burned_firms_ha, класи dNBR

Джерело: сформовано авторкою за відкритими супутниковими та геопросторовими даними.

2.4. Обробка даних FIRMS VIIRS

База активних вогнищ формувалася за даними NASA FIRMS VIIRS за 2019–2025 рр. Для зменшення кількості хибних спрацювань застосовано фільтрацію за типом детекції, яскравістю температурою та рівнем достовірності. До аналізу включалися точки, що відповідали рослинним пожежам, мали яскравісну температуру каналу I4 не нижче 320 K і рівень достовірності nominal або high. Подальша обробка включала просторовий перетин термоточок із межами об'єктів природно-заповідного фонду та агрегацію за роками, об'єктами й періодами. З огляду на просторову роздільну здатність VIIRS ці дані інтерпретувалися як індикатор активного горіння, а не як самостійна оцінка повної площі пожежі.

Для кожного об'єкта розраховано кількість вогнищ, сумарний, середній і максимальний FRP, а також кількість днів із зафіксованими пожежними подіями. Ці показники використано для аналізу частоти, теплової інтенсивності та сезонності пожежного навантаження. FRP розглядався як дистанційний індикатор потужності горіння, однак не використовувався для прямого встановлення причини займання.

2.5. Розрахунок dNBR і FIRMS-верифікація площ вигорання

Для оцінки спектральної зміни рослинного покриву розраховано індекс NBR за каналами B8A і B12 Sentinel-2 (1). Індекс dNBR визначався як різниця між передпожежним і післяпожежним значенням NBR (2).

$$NBR = \frac{B8A - B12}{B8A + B12} \quad (1)$$

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post} \quad (2)$$

Критичним методичним етапом була FIRMS-верифікація результатів dNBR. Для кожного року та об'єкта створювався буфер навколо термоточок FIRMS; до верифікованої площі включалися лише ті пікселі, які одночасно мали dNBR не нижче 0,27 і просторово збігалися з буфером активного горіння. Поріг $dNBR \geq 0,27$ використовувався як робочий індикатор середнього і вищого ступеня спектрального пошкодження, а не як універсальна межа для всіх типів рослинності. Такий підхід зменшує ризик ототожнення сезонної сенесценції степової рослинності з реальним вигоранням і робить оцінку консервативнішою.

Схема FIRMS-верифікації результатів dNBR (рис. 3) відображає не окремий зовнішній програмний продукт, а авторську послідовність просторової перевірки: dNBR-площі попередньо виділялися за спектральним порогом, після чого перетиналися з буферною зоною навколо термоточок FIRMS. Пікселі, що не мали просторового підтвердження активним горінням, не включалися до основного показника підтвердженого вигорання.

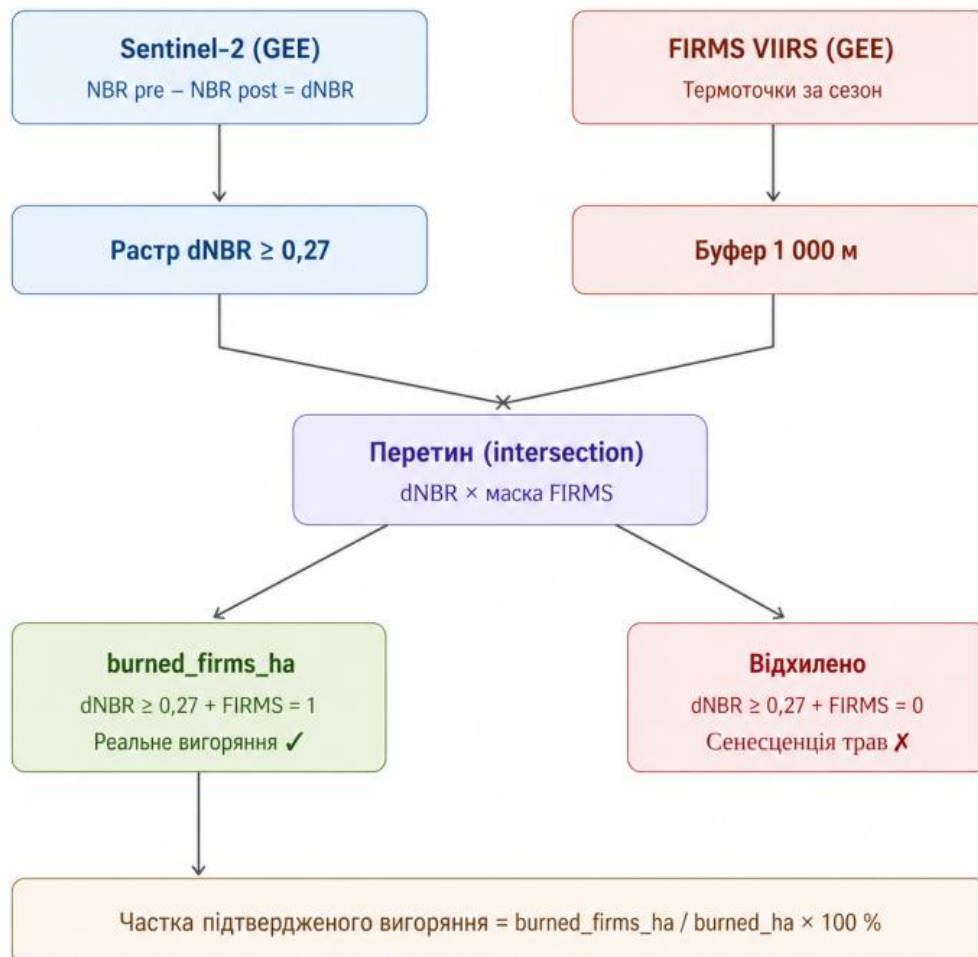


Рисунок 3. Схема FIRMS-верифікації результатів dNBR для відокремлення реального вигорання від хибнопозитивних площ

Джерело: власна розробка авторки.

2.6. Статистичний аналіз

Статистичний аналіз спрямовувався на оцінку відмінностей між довоєнним і воєнним періодами, виявлення індикативних часових трендів і визначення об'єктів із найбільш виразним приростом пожежного навантаження. Розраховувалися описові статистики, абсолютні та відносні зміни, кратність зростання, а також показники трендів. Для перевірки монотонної зміни у часових рядах використано тест Манна–Кендалла, нахил Сена застосовано для оцінки швидкості зміни, тест Петтітта — для виявлення потенційної точки зламу, а непараметричний тест Манна–Уїтні / Вілкоксона — для порівняння довоєнного та воєнного періодів⁸.

Вибір непараметричних процедур зумовлений короткою довжиною часових рядів, нерівномірним розподілом показників пожежної активності та наявністю екстремальних значень у воєнний період. З огляду на сім річних спостережень статистичні результати інтерпретувалися обережно: вони використовувалися для підтримки просторово-часової інтерпретації, але не розглядалися як достатня підстава для категоричного доведення довгострокового тренду. Статистичні розрахунки виконано у Python на основі авторських таблиць річної та періодичної агрегації показників пожежної активності, площі вигорання, інтенсивності горіння та класів dNBR.

Підсумкові таблиці та графічні матеріали сформовано після агрегації річних показників для кожного об'єкта ПЗФ. Для порівняння довоєнного та воєнного періодів розраховувалися середньорічні значення, абсолютні й відносні зміни, кратність зростання, характеристики інтенсивності пожеж, частка FIRMS-верифікованої площі та структура класів тяжкості dNBR. Саме ці узагальнені показники використано для побудови рейтингів об'єктів, карт просторової диференціації та таблиць практичних пріоритетів.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У результативному блоці поєднано регіональну, об'єктову та внутрішньооб'єктову оцінку пожежного навантаження. Регіональний рівень використано як фоновий контекст для виявлення загальної зміни пожежної активності у південній частині України; об'єктовий рівень — для порівняння 14 природоохоронних територій; внутрішньооб'єктовий рівень — для оцінки просторової локалізації та тяжкості пошкодження рослинного покриву. Така структура дозволяє розглядати пожежний режим не лише як сукупність окремих вогнищ, а як просторово організований наслідок поєднання природних умов, режиму доступу та воєнного впливу.

3.1. Загальна динаміка активних вогнищ

За даними річної агрегації FIRMS у південному регіоні кількість активних вогнищ у 2019–2021 рр. становила 41 422 випадки, тоді як у 2022–2025 рр. — 64 001 випадок. Середня потужність радіаційного випромінювання пожежі також зросла: з 6,17 до 8,46 МВт, що відповідає збільшенню приблизно на 37,1 %. Річна динаміка кількості термоточок і показників FRP (табл. 3) використовується як фоновий регіональний контекст і не ототожнюється з пожежним навантаженням лише в межах 14 об'єктів ПЗФ.

Регіональні значення відображають загальне посилення пожежної активності, однак вони не пояснюють просторову неоднорідність змін. Тому подальший аналіз зосереджено на ключових

⁸ Mann H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 1945. Vol. 13(3). P. 245–259. DOI: 10.2307/1907187; Kendall M. G. Rank Correlation Methods. 4th ed. London: Griffin, 1975; Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63(324). P. 1379–1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934; Pettitt A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*. 1979. Vol. 28(2). P. 126–135. DOI: 10.2307/2346729; Mann H. B., Whitney D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1947. Vol. 18(1). P. 50–60. DOI: 10.1214/aoms/1177730491.

об'єктах природно-заповідного фонду, де зміни можуть бути пов'язані з конкретними умовами воєнного впливу, режимом доступу та обмеженням можливостей оперативного реагування.

Таблиця 3

Річна динаміка активних вогнищ FIRMS у південному регіоні України

Рік	Період	Кількість термоточок	Сума FRP, МВт	Середній FRP, МВт	Максимальний FRP, МВт
2019	довоєнний	18 490	125 185,3	6,77	369,7
2020	довоєнний	10 958	62 964,2	5,75	251,2
2021	довоєнний	11 974	67 359,8	5,63	275,6
2022	воєнний	10 435	91 735,6	8,79	320,5
2023	воєнний	18 588	143 178,7	7,70	244,9
2024	воєнний	16 659	142 206,6	8,54	256,7
2025	воєнний	18 319	164 094,8	8,96	311,0

Джерело: власні розрахунки авторки за даними NASA FIRMS VIIRS.

3.2. Просторовий розподіл термоточок FIRMS

Картографування активних вогнищ свідчить про істотну зміну просторової концентрації пожеж у воєнний період. Найбільш виразне накопичення термоточок фіксується на територіях, пов'язаних із Кінбурнським півостровом, нижньодніпровськими заплавами, об'єктами Херсонської області та прибережними природоохоронними комплексами. Просторове зіставлення довоєнного і воєнного періодів (рис. 4) узгоджується з територіями, де у 2022–2025 рр. поєднувалися бойові дії, окупація, обмеження доступу та неможливість своєчасного гасіння. Водночас ці карти слід розглядати як індикатор просторової концентрації термальних аномалій, а не як пряме картографування повної площі вигорання.

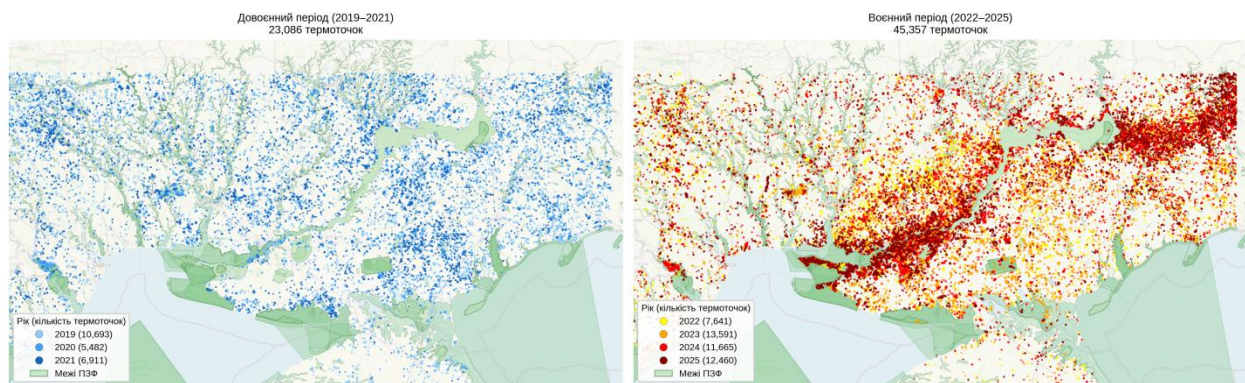


Рисунок 4. Просторовий розподіл термоточок FIRMS у довоєнний і воєнний періоди

Джерело: побудовано авторкою за відкритими супутниковими та геопросторовими даними.

3.3. Зміна пожежного навантаження за об'єктами природно-заповідного фонду

Об'єктовий рівень аналізу показав нерівномірний характер змін. Частина територій, насамперед підконтрольні об'єкти степового та каньйонно-степового типу, не демонструвала синхронного зростання пожежного навантаження. Натомість для територій, пов'язаних із бойовими діями або окупацією, зафіксовано різке збільшення кількості вогнищ і FIRMS-верифікованої площі вигорання. Кількісне порівняння середньорічних FIRMS-верифікованих площ між періодами (табл. 4) підтверджує просторово вибіркочку, а не рівномірну зміну пожежного режиму.

Таблиця 4

Порівняння FIRMS-верифікованої площі вигорання у довоєнний і воєнний періоди для ключових об'єктів

Об'єкт ПЗФ	Pre, га/рік	War, га/рік	Абсолютна зміна, га/рік	Кратність зміни
НПП Нижньодніпровський	2 534	9 398	6 863	3,7
БЗ Асканія-Нова	2 008	8 738	6 730	4,4
Чорноморський БЗ	383	3 137	2 754	8,2
РЛП Кінбурнська коса	21	2 361	2 340	112,8
НПП Кам'янська Січ	738	2 245	1 507	3,0
НПП Олешківські піски	36	667	632	18,7
НПП Білобережжя Святослава	2	616	615	352,9
НПП Приазовський	1 154	1 752	598	1,5
НПП Джарилгацький	85	250	165	2,9
НПП Великий Луг	431	539	107	1,2

Джерело: власні розрахунки авторки.

Найбільші абсолютні прирости встановлено для Нижньодніпровського національного природного парку та біосферного заповідника «Асканія-Нова». Для РЛП «Кінбурнська коса» та НПП «Білобережжя Святослава» важливим є не лише абсолютне зростання, а й різка зміна від майже відсутнього довоєнного верифікованого вигорання до значних воєнних площ. Рейтинг об'єктів за абсолютною зміною FIRMS-верифікованої площі (рис. 5) підкреслює якісне зміщення пожежного режиму, яке не може бути пояснене лише типовою міжрічною мінливістю.

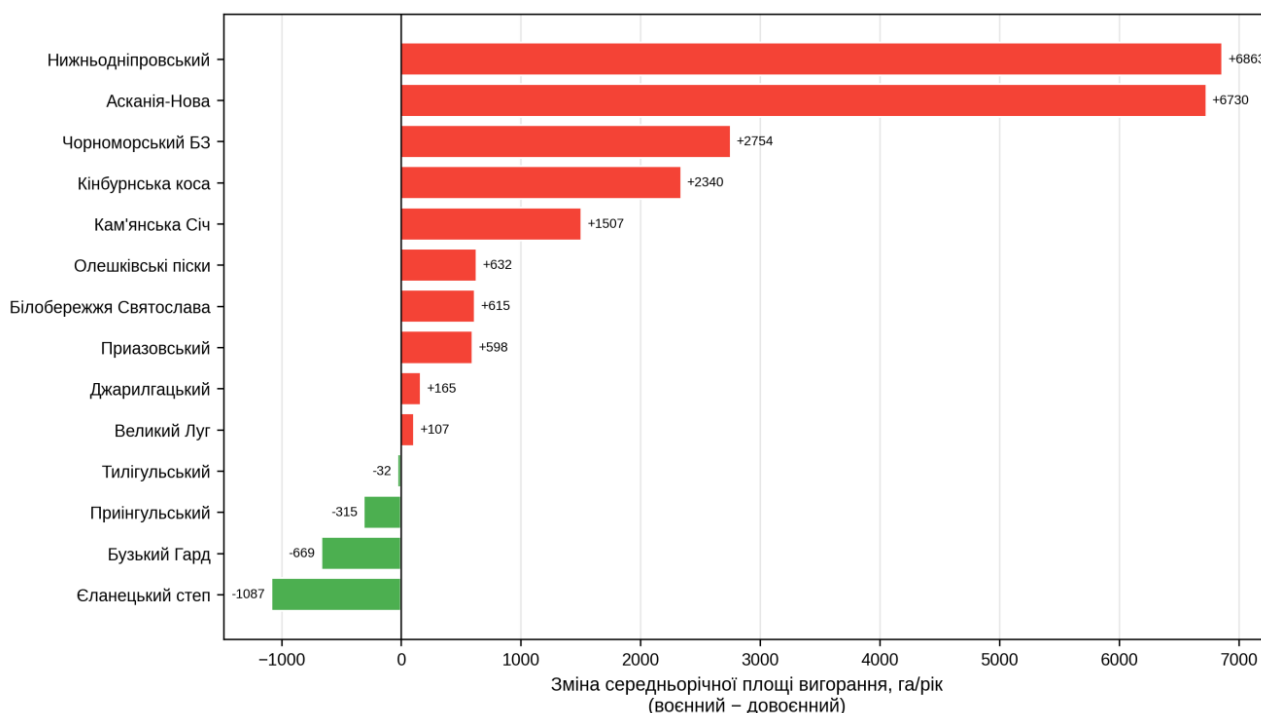


Рисунок 5. Рейтинг об'єктів природно-заповідного фонду за зміною FIRMS-верифікованої площі вигорання між довоєнним і воєнним періодами

Джерело: побудовано авторкою за відкритими супутниковими даними.

3.4. Статистична перевірка змін пожежної активності

Статистичні тести дали змогу перевірити, чи мають зафіксовані зміни не лише описовий, а й статистично виражений характер. Тест Манна–Кендалла та нахил Сена були використані для

виявлення монотонних змін у річних рядах кількості вогнищ, тоді як тест Петтітта дозволяв оцінити можливу точку зміни. Непараметричне порівняння довоєнного та воєнного періодів застосовувалося як додаткова перевірка відмінностей між двома інтервалами. Узагальнені статистичні показники для ключових об'єктів ПЗФ (табл. 5) слід трактувати як індикативні через коротку довжину ряду, особливо для територій із малими довоєнними значеннями.

Таблиця 5

Статистичні показники зміни пожежної активності для ключових об'єктів ПЗФ

Об'єкт	Pre, вогн./рік	War, вогн./рік	Δ , вогн./рік	МК p	Sen slope	Pettitt рік	Wilcoxon p
РЛП Кінбурнська коса	0,0	148,8	148,8	0,099	32,50	2 025	0,044
НПП Білобережжя Святослава	0,0	130,2	130,2	0,099	29,75	2 025	0,044
Чорноморський БЗ	2,0	85,2	83,2	0,071	17,67	2 025	0,057
НПП Нижньодніпровський	48,0	131,0	83,0	1,000	4,33	2 024	0,857
БЗ Асканія-Нова	1,3	31,5	30,2	0,176	4,60	2 025	0,099
НПП Олешківські піски	0,7	30,2	29,5	0,051	4,75	2 025	0,050
НПП Кам'янська Січ	1,0	14,5	13,5	0,004	3,75	2 025	0,050
НПП Джарилгацький	0,0	12,8	12,8	0,367	0,00	2 025	0,270
НПП Великий Луг	0,7	4,5	3,8	0,099	1,50	2 025	0,199
РЛП Тилігульський	2,3	5,5	3,2	0,293	1,33	2 025	0,582

Джерело: власні розрахунки авторки.

Найбільші прирости середньорічної кількості активних вогнищ характерні для РЛП «Кінбурнська коса», НПП «Нижньодніпровський», НПП «Білобережжя Святослава» та Чорноморського біосферного заповідника. Навіть за обмеженої довжини часового ряду ці об'єкти формують узгоджену групу територій, для яких воєнний період супроводжувався зміщенням пожежної активності у бік вищих значень. Найбільш переконливою є не окрема р-оцінка, а збіг кількох ознак: зростання кількості термоточок, збільшення верифікованої площі вигорання та просторове тяжіння змін до зон обмеженого доступу.

Додаткове узагальнення років потенційної точки зміни за тестом Петтітта показує, що основна частина зміщень пожежного режиму припадає саме на воєнний період. Найбільша кількість об'єктів формує групу з точкою зміни у 2025 р. (рис. 6), що слід інтерпретувати не як остаточно встановлений перелом, а як індикатор посилення пожежної активності наприкінці аналізованого періоду. Довоєнний сигнал 2021 р. є статистично незначущим і відображає природну міжрічну мінливість. Отже, розподіл точок зміни узгоджується із загальним висновком про зміщення пожежного режиму в умовах війни, але потребує подальшої перевірки за довшим часовим рядом.

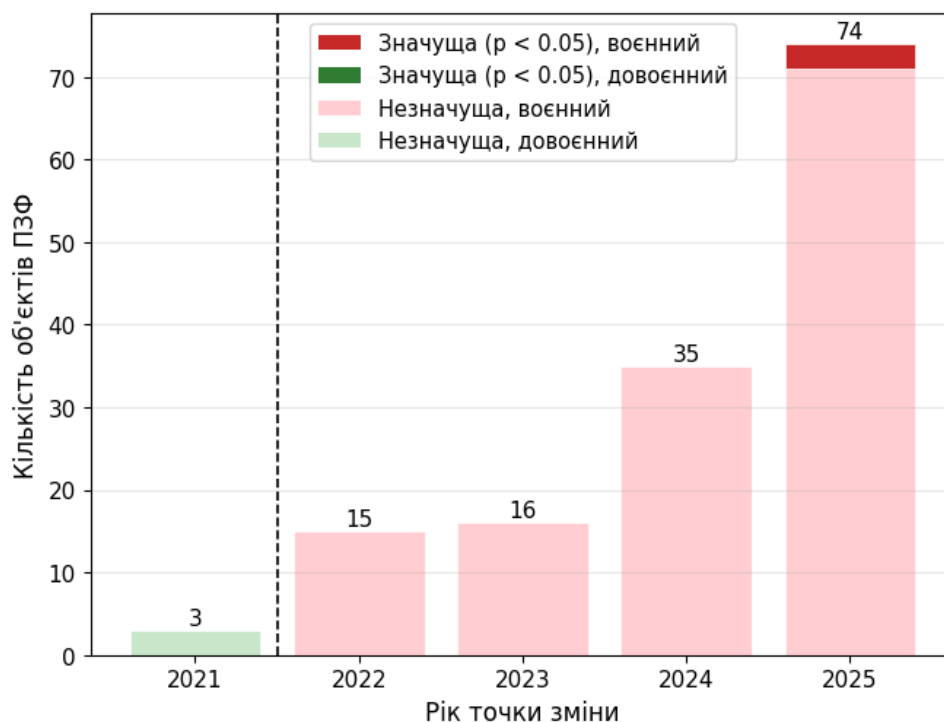


Рисунок 6. Розподіл точок зміни пожежного режиму за тестом Петтітта для об'єктів природно-заповідного фонду півдня України

Джерело: побудовано авторкою за результатами статистичної обробки даних NASA FIRMS VIIRS.

3.5. Інтенсивність і сезонність пожеж

Показник FRP дає змогу відокремити кількість зафіксованих вогнищ від їхньої теплової інтенсивності. У воєнний період для окремих територій спостерігалися не лише частіші, а й інтенсивніші пожежні події. Сукупність показників кількості вогнищ, FRP, пожежних днів, пікового місяця та річного розподілу подій (табл. 6) дозволяє оцінити інтенсивність і сезонність пожежного навантаження об'єктов. Водночас FRP не є прямим доказом причини займання, тому його доцільно інтерпретувати разом із просторовим положенням об'єкта, воєнним статусом території та сезонністю пожеж.

Таблиця 6

Інтенсивність, сезонність і річний розподіл пожежних вогнищ у ключових ПЗФ у воєнний період

Об'єкт ПЗФ	Вогнищ	FRP max, МВт	FRP сер., МВт	Днів	Пік	2022	2023	2024	2025
РЛП Кінбурнська коса	595	222,7	11,3	147	Сер	156	130	79	230
НПП Нижньодніпровський	524	176,5	12,7	142	Лют	70	43	40	371
НПП Білобережжя Святослава	521	222,7	11,6	137	Сер	126	119	71	205
Чорноморський БЗ	341	200,2	15,7	67	Тра	73	57	21	190
БЗ Асканія-Нова ім. Ф. Е. Фальц-Фейна	126	75,5	14,9	34	Вер	2	70	31	23
НПП Олешківські піски	121	80,5	17,6	25	Лип	4	31	67	19
НПП Кам'янська Січ	58	36,0	7,9	33	Лип	7	15	17	19
НПП Джарилгацький	51	21,8	8,5	8	Сер	0	48	0	3

Продовження таблиці 6

РЛП Тилігульський	22	157,3	19,6	11	Сер	3	0	8	11
НПП Приазовський	22	20,7	7,9	17	Сер	4	8	7	3
НПП Великий Луг	18	195,5	31,2	11	Лип	0	4	6	8
ПЗ Єланецький степ	6	3,8	3,6	4	Січ	5	0	1	0
РЛП Приінгульський	4	13,8	9,8	3	Жов	0	2	1	1
НПП Бузький Гард	3	9,2	7,2	1	Лип	0	0	0	3

Примітка: FRP max — максимальна теплова потужність вогнища; FRP сер. — середня теплова потужність; Днів — кількість днів із пожежами у воєнний період; Пік — місяць з найбільшою кількістю вогнищ.

Джерело: власні розрахунки авторки за даними NASA FIRMS VIIRS.

Деталізація воєнного періоду за роками підтверджує неоднорідність пожежного навантаження між об'єктами. Найбільшу кількість вогнищ зафіксовано для РЛП «Кінбурнська коса», НПП «Нижньодніпровський», НПП «Білобережжя Святослава» та Чорноморського БЗ. Водночас підвищені значення FRP max для окремих територій свідчать про наявність інтенсивних пожежних епізодів, а узагальнена річна динаміка для національних об'єктів ПЗФ зони бойових дій (рис. 7) показує, що піки не були синхронними: для частини об'єктів максимум припадав на 2023–2024 рр., тоді як для РЛП «Кінбурнська коса» та НПП «Нижньодніпровський» найбільше зростання проявилось у 2025 р.

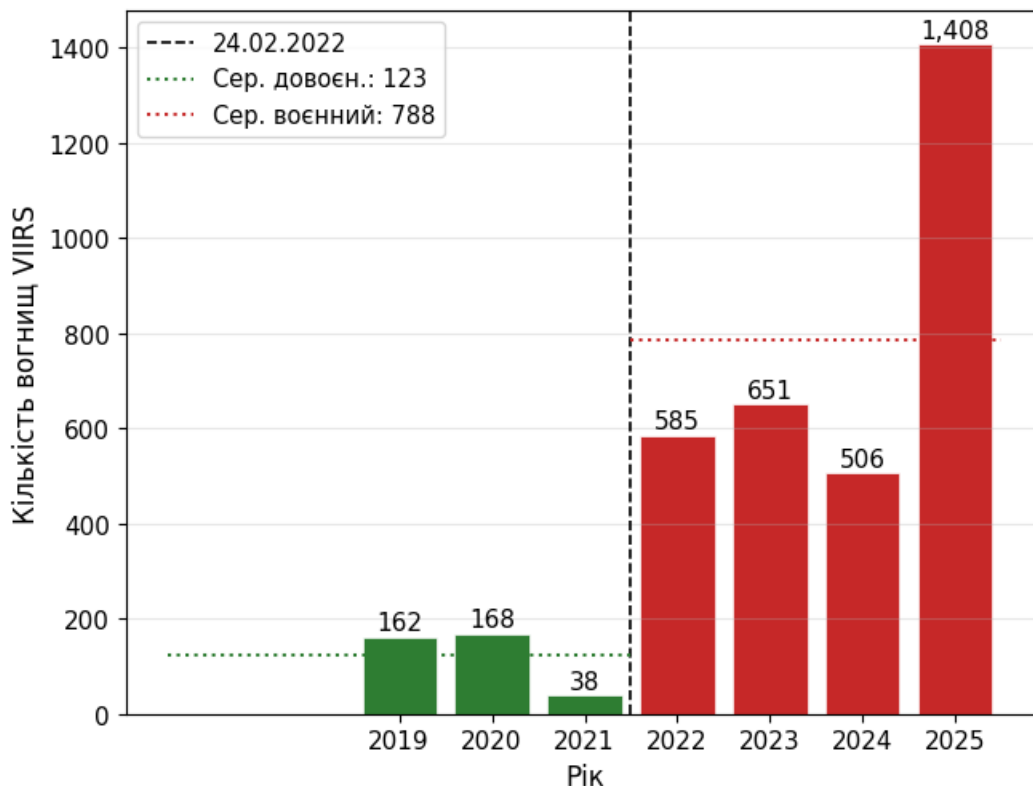


Рисунок 7. Динаміка пожежних вогнищ VIIRS у національних об'єктах природно-заповідного фонду зони бойових дій півдня України у 2019–2025 рр.

Джерело: власні розрахунки авторки за даними NASA FIRMS VIIRS.

3.6. FIRMS-верифікація dNBR і проблема хибнопозитивних площ

Порівняння загальної dNBR-площі з FIRMS-верифікованою площею підтвердило методичну необхідність просторової перевірки результатів для степових і прибережних територій. У степовій зоні сезонне висихання трав'яної рослинності може суттєво збільшувати площу спектрально визначеного пошкодження. Тому найбільш інформативним показником у дослідженні є не вся площа $dNBR \geq 0,27$, а саме FIRMS-верифікована площа, де спектральна зміна збігається з активним горінням. Об'єктове співвідношення dNBR-площі та FIRMS-верифікованої площі (табл. 7) демонструє різний рівень надійності спектрального сигналу залежно від типу території.

Таблиця 7

Співвідношення загальної dNBR-площі та FIRMS-верифікованої площі вигорання за 2019–2025 рр.

Об'єкт	dNBR-площа, га	FIRMS-верифіковано, га	Частка верифікації, %
РЛП Кінбурнська коса	14 560	9 507	65,3
НПП Білобережжя Святослава	4 896	2 471	50,5
НПП Кам'янська Січ	22 480	11 196	49,8
НПП Олешківські піски	5 720	2 776	48,5
НПП Нижньодніпровський	95 107	45 194	47,5
Чорноморський БЗ	33 758	13 694	40,6
НПП Великий Луг	9 482	3 447	36,4
БЗ Асканія-Нова	171 065	40 975	24,0
ПЗ Єланецький степ	20 244	4 616	22,8
НПП Приазовський	50 324	10 471	20,8
НПП Джарилгацький	6 244	1 254	20,1
РЛП Тилігульський	28 648	4 203	14,7
НПП Бузький Гард	34 175	3 489	10,2
РЛП Приінгульський	17 289	1 722	10,0

Джерело: власні розрахунки авторки.

Низька частка FIRMS-верифікованого сигналу для окремих степових територій свідчить про те, що спектральний метод без додаткової перевірки може значно завищувати площі реального вигорання. Натомість для лісово-чагарникових і піщано-лісових комплексів вища частка верифікації вказує на кращу відповідність dNBR реальному горінню. Отже, FIRMS-верифікація не лише зменшує хибнопозитивні площі, а й дозволяє порівнювати об'єкти з різними типами рослинності більш коректно.

Додатково річний розподіл частки FIRMS-верифікованого вигорання показує, що відповідність між спектрально визначеною dNBR-площею та підтвердженим активним горінням істотно змінювалася як між роками, так і між об'єктами (рис. 8). Найвищі частки в окремі роки фіксувалися не лише у воєнний період, а й у довоєнні роки для окремих степових територій, що підкреслює важливість річної, а не лише сумарної оцінки. Водночас для більшості великих природоохоронних об'єктів воєнного періоду підвищення частки FIRMS-верифікованого сигналу узгоджується з просторово-часовим посиленням пожежного навантаження.

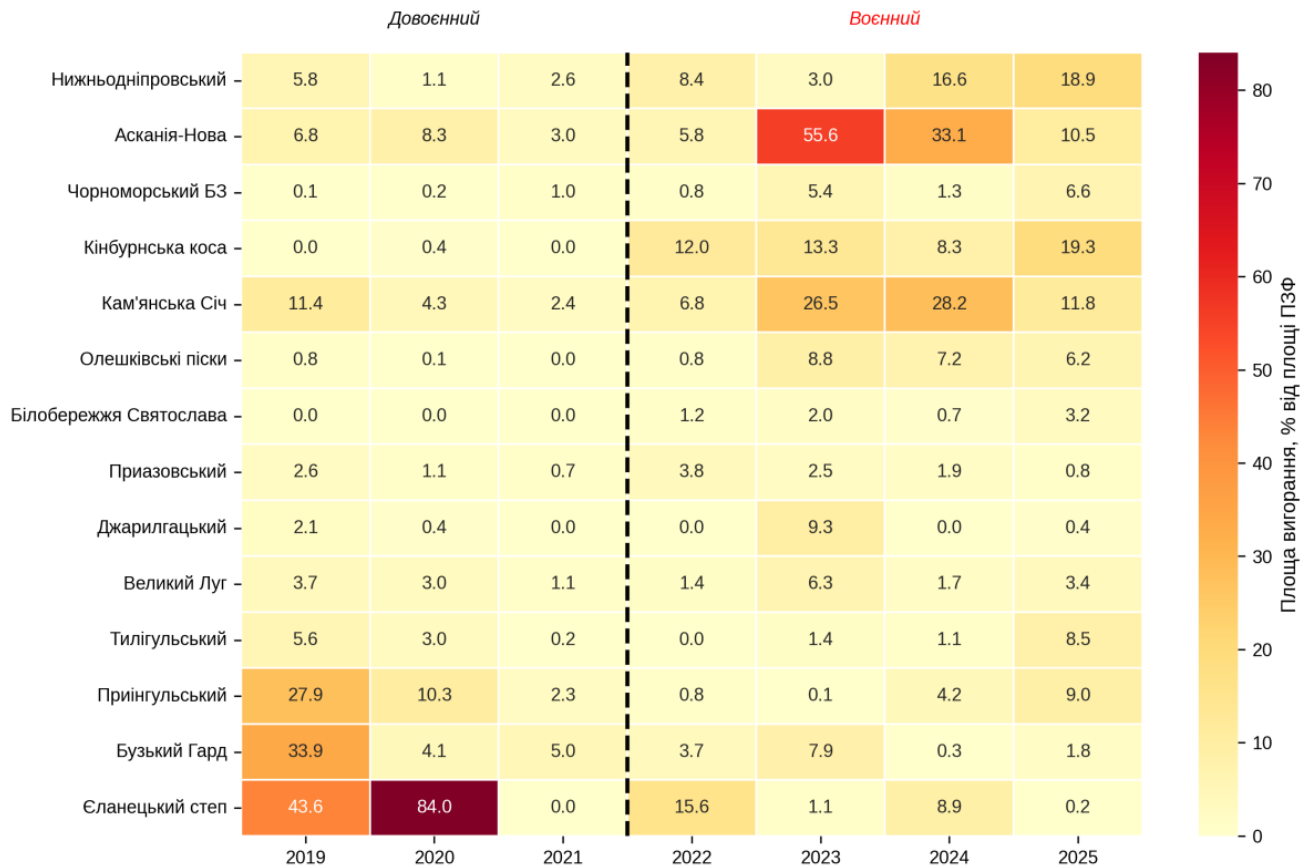


Рисунок 8. Річна частка FIRMS-верифікованої площі вигорання в загальній dNBR-площі для об'єктів природно-заповідного фонду півдня України у 2019–2025 рр.

Джерело: побудовано авторкою за результатами власної обробки даних Sentinel-2 та NASA FIRMS VIIRS.

Для методичної інтерпретації результатів важливим є також пряме зіставлення загальної dNBR-визначеної площі та FIRMS-верифікованої площі вигорання (рис. 9). Точки, розташовані близько до діагоналі високої відповідності, відображають випадки, коли спектральний сигнал dNBR добре узгоджується з активним горінням. Натомість спостереження зі значною dNBR-площею за низького FIRMS-підтвердження вказують на ймовірне завищення спектрально визначених площ без додаткової перевірки. Такі відхилення можуть бути пов'язані не лише з реальною пожежною трансформацією рослинності, а й із сезонною сенесценцією, змінами вологості, оголенням ґрунту або іншими спектральними змінами поверхні. Тому в подальших кількісних порівняннях основним результативним показником використано саме FIRMS-верифіковану площу, тоді як загальна dNBR-площа розглядалася як допоміжний індикатор потенційного пошкодження рослинного покриву.

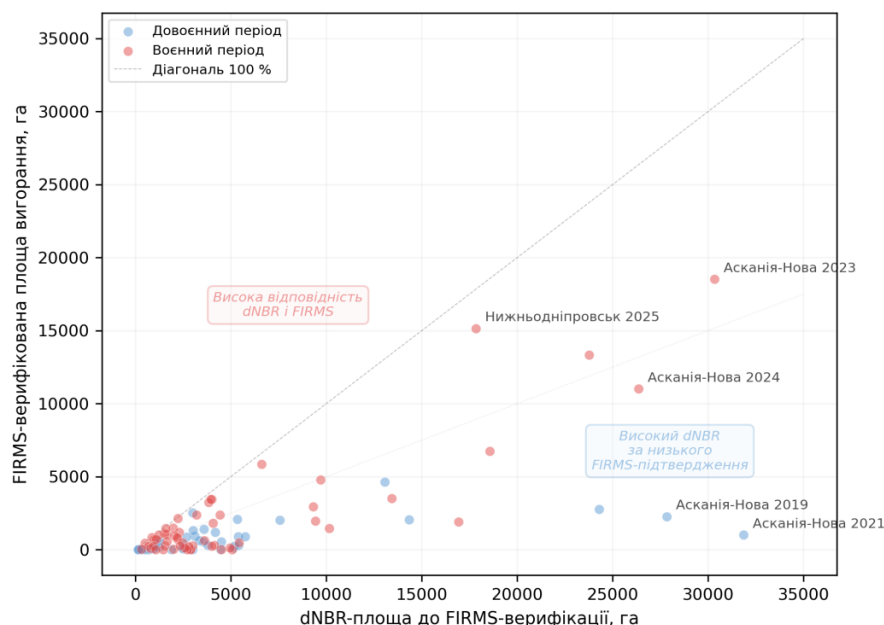


Рисунок 9. Співвідношення dNBR-визначеної та FIRMS-верифікованої площі вигорання для об’єктів природно-заповідного фонду півдня України у 2019–2025 рр.

Джерело: побудовано авторкою за результатами власної обробки даних Sentinel-2 та NASA FIRMS VIIRS.

3.7. Структура тяжкості вигорання

Аналіз класів тяжкості дозволяє перейти від оцінки площі до оцінки глибини пошкодження рослинного покриву. Для найбільш уражених територій у воєнний період зростає внесок середнього, високого та дуже високого класів dNBR. Розподіл площ за класами тяжкості для найбільш постраждалих об’єктів (рис. 10) має важливе екологічне значення, оскільки ділянки з високою тяжкістю пошкодження потребують першочергової польової перевірки, оцінки відновлення рослинності, аналізу стану ґрунтового покриву та визначення ризику повторного вигорання.

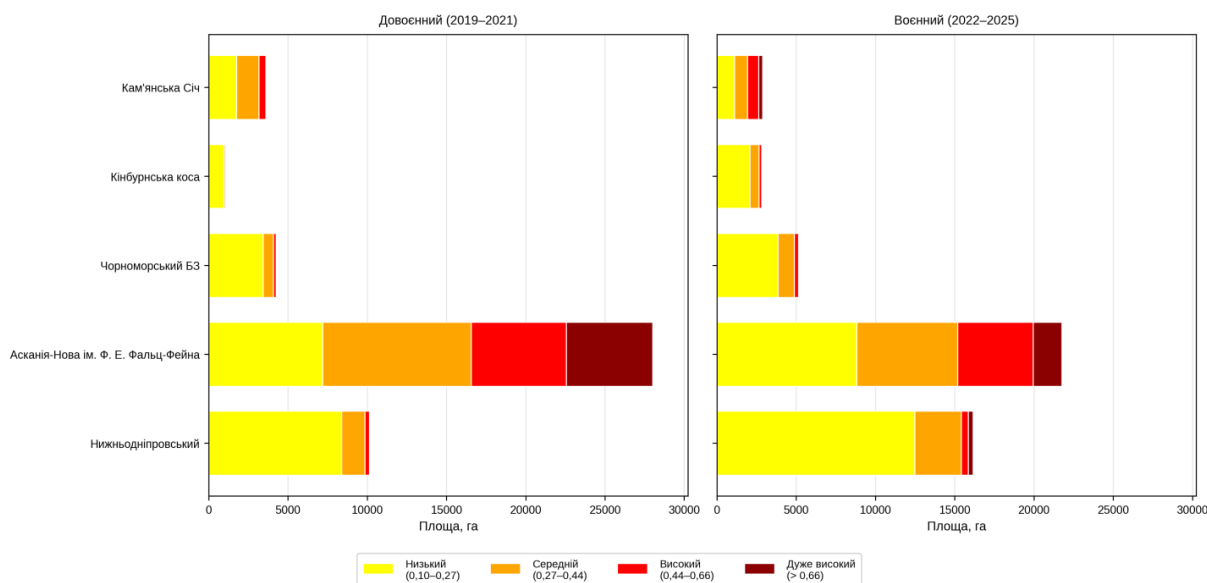


Рисунок 10. Розподіл площ за ступенем тяжкості вигорання у найбільш постраждалих об’єктах природно-заповідного фонду

Джерело: побудовано авторкою за результатами власних розрахунків.

3.8. Просторова диференціація зміни пожежного навантаження

Просторова карта зміни пожежного навантаження узагальнює результати об'єктового аналізу і вказує на виразну територіальну асиметрію (рис. 11). Найбільші прирости припадають на об'єкти, що перебували у зоні бойових дій, тимчасової окупації або поблизу лінії фронту. Підконтрольні об'єкти переважно демонстрували стабільні або нижчі значення, що підкреслює роль доступності територій, наявності управлінського контролю та можливості реагування на пожежі.

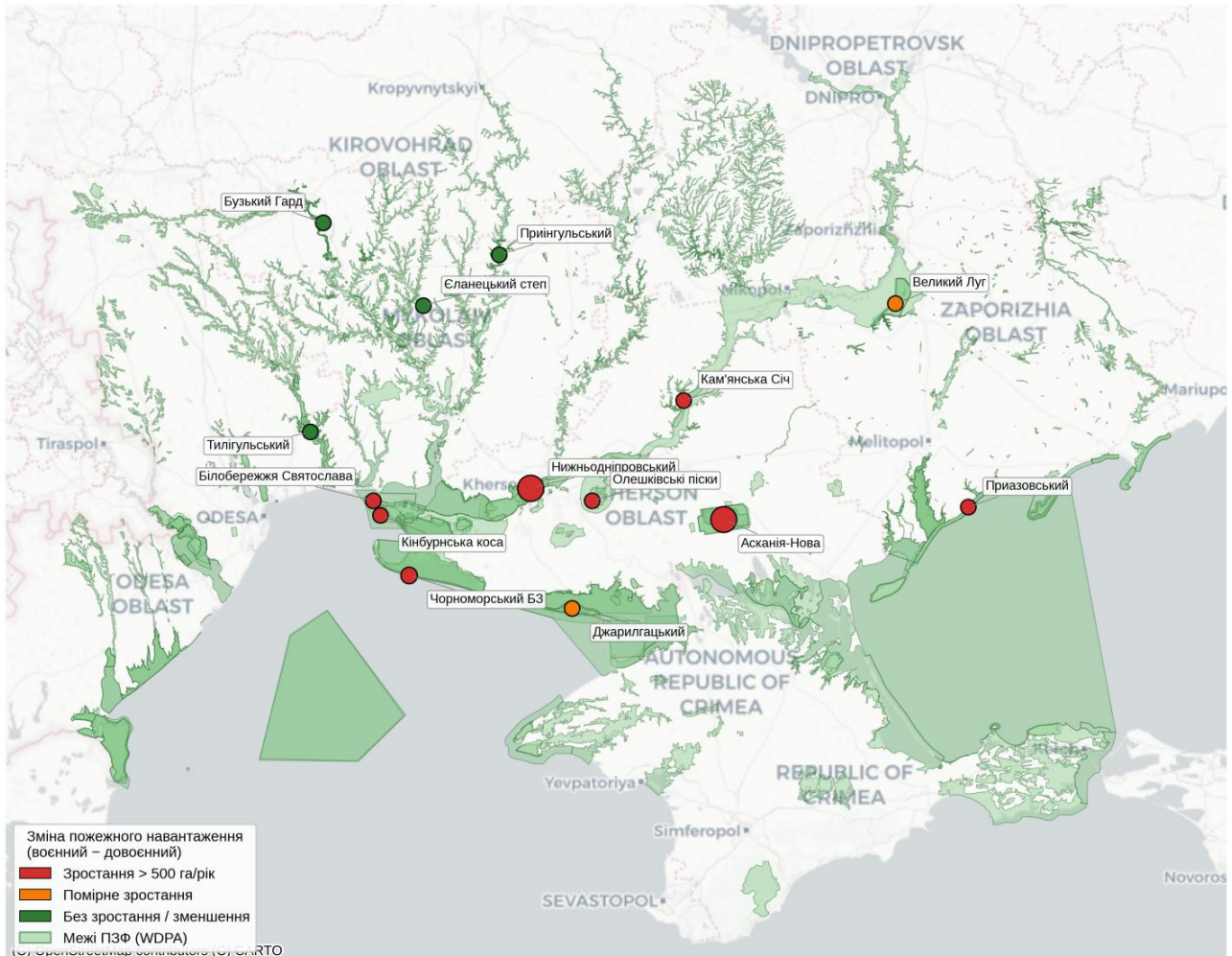


Рисунок 11. Просторова диференціація зміни пожежного навантаження на об'єкти природно-заповідного фонду півдня України у воєнний період
Джерело: побудовано авторкою за результатами власних розрахунків.

3.9. Просторова локалізація FIRMS-верифікованого пошкодження рослинності

Карти FIRMS-верифікованого dNBR деталізують просторову структуру пошкодження у межах окремих об'єктів (рис. 12). Для РЛП «Кінбурнська коса» характерним є перехід від майже відсутнього довоєнного підтвердженого сигналу до масштабного воєнного ураження. У БЗ «Асканія-Нова» помітне розширення ділянок високого і дуже високого ступеня пошкодження, тоді як у НПП «Нижньодніпровський» ураження тяжіє до заплавно-дельтових комплексів. Ці результати мають безпосереднє значення для планування післявоєнної польової верифікації, оскільки дозволяють локалізувати ділянки першочергового обстеження.

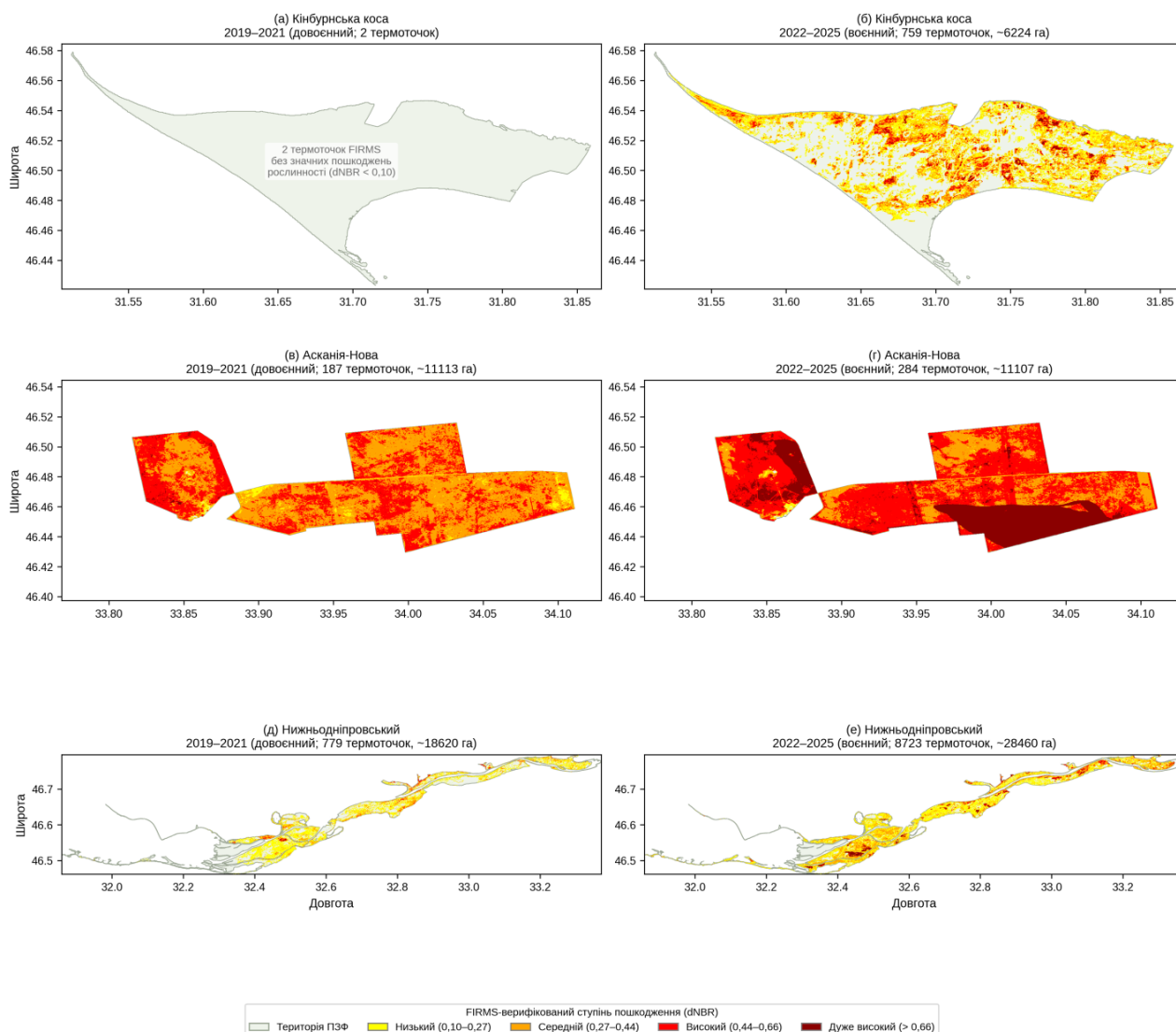


Рисунок 12. Карти FIRMS-верифікованого ступеня пошкодження рослинності за dNBR для РЛП «Кінбурнська коса», БЗ «Асканія-Нова» та НПП «Нижньодніпровський» у довоєнний і воєнний періоди

Джерело: побудовано авторкою за відкритими супутниковими даними.

3.10. Каскадний вплив війни на прикладі НПП «Нижньодніпровський»

НПП «Нижньодніпровський» є показовим прикладом того, що воєнний вплив на пожежний режим може мати не лише прямий, а й каскадний характер. Після початку повномасштабної війни територія зазнала зростання пожежної активності, а після руйнування Каховської ГЕС у 2023 р. відбулися гідрологічні зміни, що змінили умови накопичення горючої біомаси. Динаміка FIRMS-верифікованої та загальної dNBR-площі для цього об'єкта (рис. 13) узгоджується з припущенням, що подальше осушення окремих заплавних ділянок могло сприяти збільшенню площ вигорання у 2024–2025 рр.; така інтерпретація потребує подальшої польової перевірки.

Сучасні дослідження наслідків руйнування Каховської ГЕС підтверджують, що ця подія спричинила не лише короточасне затоплення нижньої течії Дніпра, а й довготривалу перебудову гідрологічних, геоморфологічних, біогеохімічних і біотичних процесів у межах колишнього водосховища, дельтових комплексів та північно-західної частини Чорного моря. Для інтерпретації

пожежного режиму НПП «Нижньодніпровський» особливо важливими є два наслідки: по-перше, зміна водного режиму заплавних і прибережних біотопів; по-друге, швидке формування нової рослинності на осушених або перезволожених ділянках, що змінює просторовий розподіл горючої фітомаси.⁹

У цьому контексті зростання FIRMS-верифікованої площі вигорання у 2024–2025 рр. не варто пояснювати лише прямими воєнними джерелами займання. Імовіріше, воно відображає каскадну взаємодію кількох чинників: воєнної недоступності території, порушення системи протипожежного реагування, післяаварійної трансформації гідрологічного режиму, мозаїчного осушення заплавних ділянок і накопичення нової трав'яної та чагарникової біомаси. Тому НПП «Нижньодніпровський» доцільно розглядати як окремий приклад комбінованого воєнно-гідрологічного впливу на пожежний режим природоохоронної території.

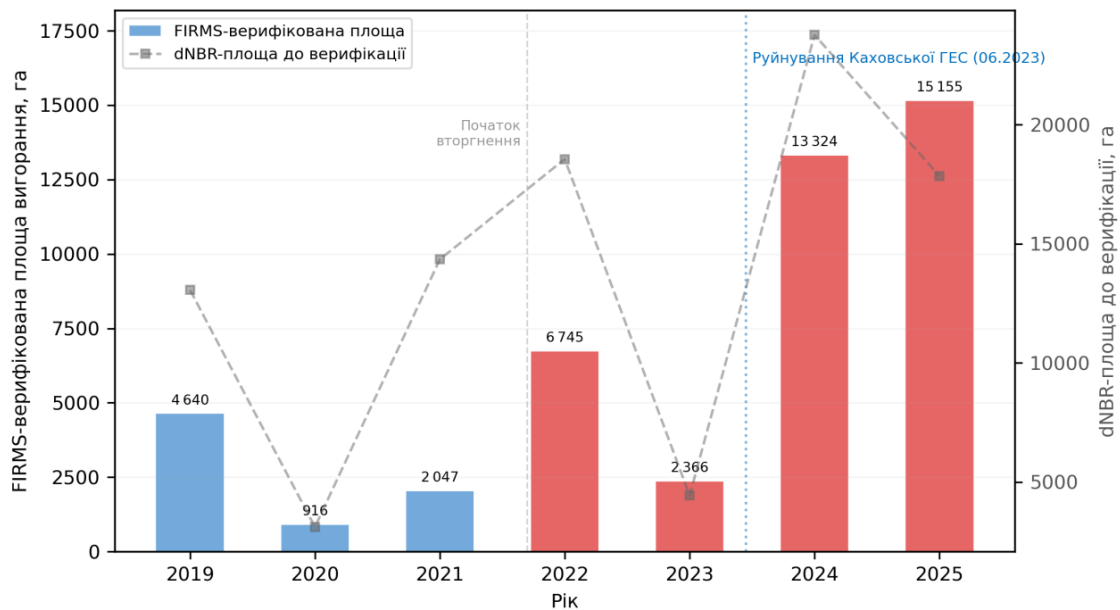


Рисунок 13. Динаміка FIRMS-верифікованої та загальної dNBR-площі вигорання у НПП «Нижньодніпровський» у 2019–2025 рр.

Джерело: побудовано авторкою за результатами власних розрахунків.

3.11. Синтез результатів

Сукупність отриманих результатів свідчить про зміну пожежного режиму природно-заповідного фонду півдня України у воєнний період. Ця зміна проявляється у зростанні кількості активних вогнищ, збільшенні FIRMS-верифікованих площ вигорання, підвищенні середньої теплової потужності пожеж і розширенні ділянок із середнім, високим та дуже високим ступенем пошкодження рослинності. Найбільш переконливими є результати, де збігаються кілька незалежних

⁹ Shumilova O., Sukhodolov A., Osadcha N., Oreshchenko A., Constantinescu G., Afanasyev S., Koken M., Osadchyi V., Rhoads B., Tockner K., Monaghan M. T., Schröder B., Nabyvanets J., Wolter C., Lietytska O., van de Koppel J., Magas N., Jähnig S. C., Lakisova V., Trokhymenko G., Venohr M., Komorin V., Stepanenko S., Khilchevskiy V., Domisch S., Blettler M., Gleick P., De Meester L., Grossart H.-P. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*. 2025. Vol. 387(6739). P. 1181–1186. DOI: 10.1126/science.adn8655; Jiang D., Khokhlov V., Tuchkovenko Y. et al. The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6. Article 185. DOI: 10.1038/s43247-025-02153-z; Vyshnevskiy V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Y., Gleick P. The destruction of the Kakhovka Dam and its consequences. *Water International*. 2023. Vol. 48. P. 631–647. DOI: 10.1080/02508060.2023.2247679; United Nations Environment Programme. Rapid environmental assessment of Kakhovka Dam breach; Ukraine. Nairobi: UNEP, 2023. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43696/Kakhovka_Dam_Breach_Ukraine_Assessment.pdf (дата звернення: 15.05.2026).

ознак: FIRMS-активність, dNBR-пошкодження, просторова концентрація в межах об'єкта та зміна від довоєнного до воєнного періоду.

Додаткові статистичні та річні узагальнення підтверджують, що зміна пожежного режиму не була одномоментною і синхронною для всіх територій. Розподіл потенційних точок зміни за тестом Петтітта вказує на переважне зміщення у воєнний період, особливо наприкінці аналізованого інтервалу, однак ці результати мають індикативний характер через коротку довжину ряду. Річний розподіл вогнищ і частки FIRMS-верифікованого вигорання показує, що піки пожежної активності та відповідність між dNBR-сигналом і активним горінням істотно відрізнялися між об'єктами, що підкреслює необхідність об'єктового, а не лише регіонального аналізу.

Найбільш виразні зміни пов'язані з територіями, де природні фактори пожежної небезпеки поєдналися з воєнними чинниками: обмеженням доступу, відсутністю оперативного гасіння, окупацією, мінною небезпекою та гідрологічними порушеннями. Підконтрольні об'єкти не демонстрували аналогічного системного посилення пожежного навантаження, що підтверджує необхідність урахування воєнного статусу територій під час інтерпретації дистанційних даних.

Методично важливим результатом є підтвердження доцільності інтеграції FIRMS і dNBR. Для степових екосистем спектральна оцінка без верифікації може суттєво завищувати площі вигорання, тоді як FIRMS-маска дозволяє виокремити ділянки, де спектральна зміна має підтвердження активним горінням. Це робить запропонований підхід придатним для масштабування на інші природоохоронні території України, особливо у випадках обмеженого наземного доступу.

4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Воєнний статус територій як чинник зміни пожежного режиму

Отримані результати показують, що пожежне навантаження у воєнний період не розподілялося рівномірно між об'єктами природно-заповідного фонду. Найбільші прирости зосереджені на територіях, де природна пожежна небезпека поєдналася з воєнними обмеженнями: окупацією, мінною небезпекою, обстрілами та відсутністю можливості оперативного гасіння. Така закономірність важлива для оцінки воєнних екологічних збитків, оскільки вказує на необхідність просторового врахування не лише самого факту пожежі, а й режиму доступу до території. Вона також узгоджується з сучасними узагальненнями щодо екологічних наслідків війни в Україні, де пожежі, пошкодження рослинного покриву та порушення функціонування природоохоронних територій розглядаються як окремі компоненти воєнної деградації довкілля.¹⁰

Водночас на підконтрольних територіях окремі показники могли залишатися стабільними або зменшуватися. Це може бути пов'язано з кращим контролем пожеж, меншим прямим воєнним впливом, зміною господарської активності або обмеженням доступу населення до природних територій. Така неоднорідність не дозволяє пояснювати всі пожежі лише кліматичними або сезонними факторами. Отже, воєнний статус території доцільно розглядати як один із ключових інтерпретаційних чинників, який модифікує природну пожежну небезпеку через доступність, реагування та ймовірність антропогенних джерел займання.

¹⁰ UNEP. The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review. Nairobi, 2022; Leal Filho W., Eustachio J. H. P. P., Fedoruk M., Lisovska T. War in Ukraine: an overview of environmental impacts and consequences for human health. *Frontiers in Sustainable Resource Management*. 2024. Vol. 3. DOI: 10.3389/fsrma.2024.1423444; Eklund L., Dinc P. Fires as collateral or means of war: challenges of environmental peacebuilding in the Kurdistan Region of Iraq. *Ecology and Society*. 2024. Vol. 29(3). Article 25. DOI: 10.5751/ES-15316-290325; Zibtsev S., Pasternak V., Vasylyshyn R., Myroniuk V., Sydorenko S., Soshenskyi O. Assessment of carbon emissions due to landscape fires in Ukraine during war in 2022. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2024. Vol. 15(1). P. 126–139. DOI: 10.31548/forest/1.2024.126.

4.2. Методичне значення FIRMS-верифікації dNBR

Поєднання dNBR і FIRMS має ключове методичне значення для степових і прибережних екосистем. dNBR є чутливим до зміни структури рослинного покриву й традиційно використовується для оцінки тяжкості пожежного ураження, однак у посушливих степових умовах він також реагує на сезонне висихання трав'яної рослинності, зміну вологості ґрунту та оголення поверхні. FIRMS, навпаки, фіксує активне горіння, але не дає повної площі та тяжкості пошкодження. Інтеграція цих джерел дає змогу обмежити площі dNBR тими ділянками, де було підтверджено активну термальну аномалію.¹¹ Співвідношення dNBR-визначеної та FIRMS-верифікованої площі додатково показує, що відхилення від діагоналі високої відповідності слід трактувати як ознаку можливої переоцінки спектрального сигналу, а не як автоматичне підтвердження реального вигорання.

Запропонований підхід не замінює польову верифікацію, але в умовах воєнного часу створює обґрунтовану основу для пріоритизації подальших обстежень. Його доцільно застосовувати передусім для територій, де доступ відсутній або небезпечний, а потреба у просторово детальній оцінці пошкоджень є високою. Найбільшу цінність методика має як інструмент попереднього дистанційного скринінгу: вона не встановлює остаточну екологічну шкоду, але визначає ділянки, де ймовірність реального пожежного ураження є найвищою.

4.3. Каховський фактор у формуванні пожежного навантаження нижньодніпровських територій

Результати для НПП «Нижньодніпровський» слід інтерпретувати з урахуванням сучасних досліджень Каховської катастрофи. Після руйнування греблі відбулася різка зміна водного балансу, оголення значних площ дна колишнього водосховища, перебудова руслово-заплавних процесів і запуск швидкої сукцесії нових рослинних угруповань. Польові та дистанційні дослідження засвідчують, що на території колишнього Каховського водосховища протягом першого року після осушення сформувалися різні типи нових біотопів, включно з вербово-тополевыми заростями, болотистими ділянками та площами з розрідженою рослинністю.¹²

Для пожежного моніторингу це має принципове значення: післягідрологічна трансформація території змінює не лише доступність води, а й паливну структуру ландшафту. Частина ділянок може тимчасово залишатися перезволоженою і менш пожежонебезпечною, тоді як інші — швидко переходити до стану сезонно сухих трав'яно-чагарникових комплексів. Саме тому поєднання dNBR і FIRMS є доцільним для таких територій: dNBR показує зміну спектрального стану рослинності, а FIRMS дає незалежне підтвердження факту активного горіння. Водночас інтерпретація результатів потребує обережності, оскільки частина спектральних змін після 2023 р. може бути пов'язана не з

¹¹ Key C. H., Benson N. C. Landscape Assessment. FIREMON. USDA Forest Service, 2006; Miller J. D., Thode A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape. *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 109(1). P. 66–80; Parks S. A., Dillon G. K., Miller C. A new metric for quantifying burn severity. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6(3). P. 1827–1844; NASA FIRMS. VIIRS active fire and thermal anomalies. NASA, 2026; Schroeder W. et al. The New VIIRS 375 m active fire detection data product. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 143. P. 85–96; Llorens R. et al. Soil Burn Severity Assessment Using Sentinel-2 and Radiometric Measurements. *Fire*. 2024. Vol. 7(12). Article 487; Al-hasn R., Almuhammad R. Burned area determination using Sentinel-2 satellite images. *Journal of Forest Science*. 2022. Vol. 68(3). P. 96–106; Chen L. et al. Burned Area Mapping and Fire Severity Assessment of Forest–Grassland Ecosystems Using Time-Series Landsat Imagery. *Fire*. 2025. Vol. 8(9). Article 337.

¹² Shumilova O. et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*. 2025. Vol. 387(6739). P. 1181–1186; Jiang D. et al. The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6. Article 185; Vyshnevskiy V. et al. The destruction of the Kakhovka Dam and its consequences. *Water International*. 2023. Vol. 48. P. 631–647; UNEP. Rapid environmental assessment of Kakhovka Dam breach; Ukraine. Nairobi, 2023.

пожежами, а з осушенням, перезволоженням, замуленням, сукцесією або оголенням ґрунтово-седиментаційних поверхонь.¹³

4.4. Обмеження дослідження

Основні обмеження пов'язані з просторовою роздільною здатністю FIRMS VIIRS, хмарністю знімків Sentinel-2, невизначеністю точних причин кожного займання та відсутністю повної наземної перевірки на окупованих або замінованих територіях. Буферна FIRMS-верифікація зменшує ризик хибнопозитивних площ, але не усуває всіх джерел невизначеності, зокрема можливих пропусків малих, короткотривалих або низькоінтенсивних пожеж. Крім того, застосований поріг $dNBR \geq 0,27$ є робочим порогом для зіставлення об'єктів у межах цього дослідження; для інших регіонів і типів рослинності він потребуватиме калібрування.

Окремим статистичним обмеженням є коротка довжина річного ряду 2019–2025 рр. За такої кількості спостережень результати тестів Манна–Кендалла, Петтітта та непараметричного порівняння періодів слід розглядати не як остаточне доведення довгострокового тренду, а як індикативну оцінку напрямку та моменту зміщення пожежної активності. Надалі ці висновки потребуватимуть перевірки на довшому часовому ряді.

Інтерпретація FRP також потребує обережності. Підвищені значення можуть бути пов'язані з інтенсивнішим горінням або з особливостями джерела займання, але дистанційні дані самі по собі не дозволяють однозначно ідентифікувати конкретну причину кожної пожежі. Тому висновки щодо воєнного походження пожеж базуються не на одиничних термоточках, а на поєднанні просторово-часових закономірностей, статусу територій та характеру змін у порівнянні з довоєнним періодом.

4.5. Практичне значення і можливості масштабування

Результати мають практичне значення для оцінки воєнних екологічних збитків, планування польових обстежень після деокупації, визначення пріоритетів відновлення та розроблення систем оперативного моніторингу. Для територій із високою часткою важких класів $dNBR$ першочерговими є польова перевірка стану рослинності, оцінка ґрунтового покриву, виявлення повторних пожеж і аналіз потенціалу природного відновлення. Для територій із низькою часткою FIRMS-верифікації доцільним є додатковий контроль хибнопозитивних $dNBR$ -сигналів за допомогою часових рядів $NDVI/NBR$, візуальної інтерпретації знімків і, за можливості, наземної перевірки. Узагальнення напрямів використання результатів для післявоєнного відновлення (рис. 14) структурує ці практичні пріоритети за блоками моніторингу, верифікації та управлінського реагування.

Методика $dNBR \times FIRMS$ є відтворюваною, оскільки базується на відкритих супутникових даних та може бути реалізована у Google Earth Engine і Python. Це дозволяє застосовувати її для інших степових, прибережних і важкодоступних природоохоронних територій України, а також для оперативного оновлення оцінок у разі появи нових даних FIRMS NRT. У прикладному вимірі методика може використовуватися як перший рівень дистанційної пріоритизації, після якого мають виконуватися цільові польові обстеження, оцінка біотичних втрат і розроблення заходів відновлення.

¹³ Kuzemko A. A., Prylutskyi O., Kolomytsev G. et al. Initial stages of revegetation at the bottom of the drained Kakhovka Reservoir (Ukraine): synthesis of field surveys and remote sensing. *Ukrainian Botanical Journal*. 2025. Vol. 82(5). P. 488–505; Didukh Ya. P., Kuzemko A. A., Khodosovtsev O. Ye., Chusova O. O., Borsukevych L. M., Skobel N. O., Mikhailuk T. I., Moysiienko I. I. First year of floodplain forest restoration at the bottom of the former Kakhovka reservoir. *Chornomorski Botanical Journal*. 2024. Vol. 20(3). P. 305–326. DOI: 10.32999/ksu1990-553X/2024-20-3-5; Dzyba A., Kyriienko V. Recovery of Velyki Luh through ecological restoration of the Kakhovka Reservoir. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2024. Vol. 15(1). P. 25–40. DOI: 10.31548/forest/1.2024.25.

Об'єкт ПЗФ	Статус території	Зміна площі вигорання (воєнний – довоєнний), га/рік	Щорічне вигорання у воєнний період, %	Пріоритет відновлення	Рекомендовані заходи
НПП Нижньодніпровський	Лінія фронту	+6,863	11.7	Критичний	Розмінування, відновлення гідрорежиму заплави
БЗ Асканія-Нова	Окупація	+6,730	26.2	Критичний	Оцінка ґрунту, протипожежні смуги, перезасівання
БЗ Чорноморський	Зона БД	+2,754	3.5	Високий	Моніторинг прибережних екосистем та орнітофауни
РЛП Кінбурнська коса	Лінія фронту	+2,340	13.2	Критичний	Розмінування, протипожежні розриви, лісовідновлення
НПП Кам'янська Січ	Прифронтна	+1,507	18.3	Високий	Контрольовані відпали, NDVI-моніторинг
НПП Олешківські піски	Окупація	+632	5.7	Критичний	Лісовідновлення (30–50 р.), фіксація пісків
НПП Білобережжя Святослава	Зона БД	+615	1.8	Високий	Оцінка лісових масивів, рекультивація
НПП Приазовський	Окупація	+598	2.2	Помірний	Моніторинг степу, контроль інвазивних видів
НПП Джарилгацький	Окупація	+165	2.4	Помірний	Оцінка островних екосистем після деокупації
НПП Великий Луг	Окупація	+107	3.2	Помірний	Моніторинг заплавної екосистем р. Дніпро
РЛП Тилігульський	Підконтрольна	–32	2.8	Стабільний	Штатний моніторинг
РЛП Приінгульський	Підконтрольна	–315	3.5	Стабільний	Штатний моніторинг, контрольовані відпали
НПП Бузький Гард	Підконтрольна	–669	3.5	Стабільний	Штатний моніторинг каньйонних екосистем
ПЗ Єланецький степ	Підконтрольна	–1,087	6.4	Стабільний	Штатний моніторинг, природне відновлення

Рисунок 14. Узагальнені напрями використання результатів дистанційного моніторингу для планування післявоєнного відновлення природно-заповідного фонду
Джерело: узагальнено авторкою за результатами дослідження.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено та апробовано інтегрований підхід до оцінки пожежного навантаження на об'єкти природно-заповідного фонду півдня України, що поєднує дані активних вогнищ NASA FIRMS VIIRS, спектральну оцінку тяжкості вигорання за Sentinel-2 dNBR та FIRMS-верифікацію dNBR-визначених площ.

2. Установлено, що воєнний період 2022–2025 рр. характеризується посиленням пожежної активності насамперед для природоохоронних територій, пов'язаних із бойовими діями, тимчасовою окупацією або обмеженим доступом. Найбільші прирости FIRMS-верифікованої площі вигорання встановлено для НПП «Нижньодніпровський», БЗ «Асканія-Нова», Чорноморського БЗ та РЛП «Кінбурнська коса». Найбільша кількість пожежних вогнищ і пожежних днів у воєнний період характерна для РЛП «Кінбурнська коса», НПП «Нижньодніпровський», НПП «Білобережжя Святослава» та Чорноморського БЗ.

3. Показано, що зміни пожежного навантаження мають виразну просторову диференціацію: найбільше зростання пов'язане з територіями, що перебували у зоні бойових дій, тимчасової окупації або обмеженого доступу, тоді як підконтрольні об'єкти переважно не демонстрували аналогічного посилення. Індикативні статистичні узагальнення вказують на переважне зміщення потенційних точок зміни пожежного режиму у воєнний період.

4. Доведено методичну необхідність FIRMS-верифікації dNBR для степових, прибережних і заплавної екосистем, де сезонна сенесценція, зміна вологості рослинності та інші спектральні чинники можуть призводити до завищення площі dNBR-визначеного пошкодження. Співвідношення між загальною dNBR-площею та FIRMS-верифікованою площею підтверджує, що найбільш інформативним показником для цього дослідження є саме площа, де спектральний сигнал узгоджується з активним горінням.

5. На прикладі НПП «Нижньодніпровський» встановлено каскадний характер воєнного впливу, коли прямі пожежні наслідки поєднуються з гідрологічними змінами після руйнування Каховської ГЕС, осушенням заплавних ділянок і подальшим накопиченням горючої рослинної маси.

6. Показано придатність дистанційного зондування Землі як перспективного й практично необхідного інструменту попередньої оцінки екологічних наслідків війни для важкодоступних природоохоронних територій. Запропонований підхід рекомендовано використовувати для інших об'єктів природно-заповідного фонду України, оцінки воєнних екологічних збитків і планування післявоєнного відновлення з обов'язковим урахуванням обмежень короткого часового ряду та потреби у подальшій польовій верифікації.

**КІБЕРБЕЗПЕКА МЕДИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЯК СКЛАДОВА РЕАГУВАННЯ
СИСТЕМИ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я НА БІОЛОГІЧНІ, ХІМІЧНІ ТА
ЕКОЛОГІЧНІ ЗАГРОЗИ В УМОВАХ ВІЙНИ**

**CYBERSECURITY OF MEDICAL INFORMATION AS A COMPONENT OF THE
HEALTHCARE SYSTEM'S RESPONSE TO BIOLOGICAL, CHEMICAL AND
ENVIRONMENTAL THREATS IN WARTIME**

Макух Христина Ігорівна, кандидат фармацевтичних наук, доцент, клінічний фармацевт, Благодійна організація «Благодійний фонд «СУПЕРЛЮДИ», makuh.hrystyna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6796-7342>

Ривак Тетяна Богданівна, кандидат фармацевтичних наук, ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького», tanusha1905@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9491-1109>

Федоришин Тарас Михайлович, кандидат медичних наук, лікар-хірург, КНП «Львівське територіальне медичне об'єднання “Багатoproфільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги”», ВП «Лікарня Святого Пантелеймона», fedoryshyn.tm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8683-1221>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.24>

Анотація. У роботі розглянуто кібербезпеку медичної інформації як складову реагування системи охорони здоров'я на біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни. Обґрунтовано, що медична інформація є критичним ресурсом для забезпечення безперервності лікування, евакуації постраждалих, інфекційного контролю, епідеміологічного нагляду, безпечної фармакотерапії, реабілітації та управління ресурсами закладу охорони здоров'я. Показано, що цифрова трансформація охорони здоров'я, зокрема впровадження медичних інформаційних систем, електронних медичних записів, телемедицини, аналітики великих даних, штучного інтелекту та інтернету речей у медицині, створює нові можливості для підвищення якості медичної допомоги, однак одночасно формує ризики для конфіденційності, цілісності та доступності медичних даних. Проаналізовано основні кіберзагрози для медичної інформації: витік, втрату, несанкціоновану модифікацію даних, DDoS-атаки, фішинг, людський фактор, несанкціонований доступ і ризики неконтрольованого використання штучного інтелекту. Запропоновано концептуальну модель кіберстійкості медичної інформації в умовах війни, яка включає стратегічний, організаційний, технологічний, кадровий, клініко-безпековий, воєнно-кризовий та AI-рівень. Обґрунтовано, що кібербезпека медичної інформації має розглядатися як складова безпеки пацієнта, громадського здоров'я, управління якістю та кризової стійкості закладу охорони здоров'я.

Ключові слова: кібербезпека, біологічні, хімічні та екологічні загрози, цифрова трансформація охорони здоров'я, медична інформаційна система, безпека пацієнта, штучний інтелект.

Abstract. This paper analyses the role of medical information cybersecurity as a component of the healthcare system's response to biological, chemical and environmental threats in wartime. It is

substantiated that medical information constitutes a critical resource for ensuring continuity of treatment, evacuation of casualties, infection control, epidemiological surveillance, safe pharmacotherapy, rehabilitation, and healthcare facility resource management. The paper demonstrates that the digital transformation of healthcare – including the implementation of health information systems, electronic medical records, telemedicine, big data analytics, artificial intelligence, and the Internet of Medical Things – creates new opportunities for improving the quality of medical care while simultaneously generating risks to the confidentiality, integrity, and availability of medical data. The main cyber threats to medical information are analysed, including data breaches, data loss, unauthorised data modification, DDoS attacks, phishing, the human factor, unauthorised access, and the risks of uncontrolled use of artificial intelligence. A conceptual model of medical information cyber-resilience in wartime is proposed, comprising seven levels: strategic, organisational, technological, personnel, clinical safety, military-crisis, and AI. It is substantiated that cybersecurity of medical information should be considered as an integral component of patient safety, public health, quality management, and crisis resilience of a healthcare facility.

Keywords: cybersecurity, biological, chemical and environmental threats, digital transformation of healthcare, health information system, patient safety, artificial intelligence (AI).

ВСТУП

Цифрова трансформація охорони здоров'я є одним із ключових напрямів модернізації медичної галузі, що спрямований на підвищення якості, доступності, безпечності та ефективності медичної допомоги. У сучасних умовах цифрові технології дедалі активніше інтегруються у клінічні, управлінські, освітні та аналітичні процеси закладів охорони здоров'я. До основних складових цифрового здоров'я належать електронна система охорони здоров'я (ЕСОЗ), медичні інформаційні системи, електронні медичні записи, телемедицина, мобільні медичні застосунки, аналітика великих даних, штучний інтелект, інтернет речей у медицині та комплексні рішення з кібербезпеки^{1,2}.

Цифрова трансформація охорони здоров'я є не лише технічним оновленням або переходом від паперової до електронної документації. Її сутність полягає у зміні самої логіки функціонування медичної системи, переході від автоматизації окремих процесів до побудови інтегрованої екосистеми цифрового здоров'я. Тому поряд із перевагами цифровізації виникає низка нових ризиків, пов'язаних із безпекою, достовірністю, цілісністю та доступністю медичної інформації.

Особливої актуальності питання кібербезпеки медичної інформації набуває в умовах воєнного стану. Повномасштабна війна в Україні створила не лише безпосередні фізичні, біологічні, хімічні, екологічні та гуманітарні загрози, а й посилила вразливість цифрової інфраструктури охорони здоров'я. Медичні заклади в умовах війни працюють із великим обсягом чутливої інформації про пацієнтів, зокрема даними про бойові травми, хірургічні втручання, інфекційні ускладнення, результати лабораторних досліджень, антибіотикотерапію, реабілітацію, евакуаційні маршрути та соціальний статус пацієнтів. Втрата, витік або спотворення такої інформації може мати не лише

¹Міністерство охорони здоров'я України. Цифрова трансформація охорони здоров'я України. URL: <https://moz.gov.ua/uk/cifrova-transformaciya-ohoroni-zdorov-ya-ukrayini-2> (дата звернення: 21 травня 2026).

²World Health Organization. Global strategy on digital health 2020-2025. Geneva: World Health Organization, 2021. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240020924> (дата звернення: 21 травня 2026).

правові чи етичні наслідки, а й безпосередньо впливати на безпеку пацієнта, якість лікування та стійкість закладу охорони здоров'я загалом^{3,4}.

У контексті біологічних, хімічних та екологічних загроз на тлі повномасштабної війни медична інформація виконує не лише клінічну, а й безпекову та управлінську функцію. Дані про інфекційні ускладнення, мікробіологічні результати, антибіотикорезистентність, вплив токсичних речовин, екологічні фактори, маршрути евакуації та потребу в медичних ресурсах є основою для своєчасного реагування системи охорони здоров'я. Тому захист такої інформації від витоку, втрати, спотворення або блокування має розглядатися як складова не лише інформаційної безпеки, а й біологічної, хімічної та екологічної безпеки в умовах воєнного стану.

У межах політики інформаційної безпеки медична галузь розглядається як одна з найбільш вразливих до кібератак, оскільки медичні працівники працюють із надзвичайно чутливими даними, а їх втрата, знищення або спотворення може мати критичні наслідки для пацієнта, закладу охорони здоров'я та системи медичної допомоги загалом. Окремо наголошується на зростанні кібератак і DDoS-атак від початку повномасштабного вторгнення в Україну^{5,6,7}.

Отже, кібербезпека в охороні здоров'я в умовах війни має розглядатися не як вузька технічна функція, а як складова управління ризиками, безпеки пацієнта та безперервності медичної допомоги.

Мета дослідження – обґрунтувати значення кібербезпеки медичної інформації як складової реагування системи охорони здоров'я на біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни та запропонувати концептуальну модель кіберстійкості медичних даних для забезпечення безпеки пацієнта, управління якістю й кризової стійкості закладу охорони здоров'я.

МЕТОДОЛОГІЯ

Дослідження виконано у форматі оглядово-аналітичної роботи з елементами концептуального моделювання. Матеріалами для аналізу стали наукові публікації, навчально-методичні матеріали, нормативно-правові акти та міжнародні рекомендації, присвячені питанням цифрової трансформації охорони здоров'я, кібербезпеки медичної інформації, функціонування медичних інформаційних систем, захисту персональних даних, електронних медичних записів, телемедицини, аналітики великих даних, використання штучного інтелекту та управління ризиками в закладах охорони здоров'я.

Методи дослідження включали бібліографічний метод, системний аналіз, структурно-логічний аналіз, порівняльний аналіз, узагальнення та моделювання. Бібліографічний метод використовувався для опрацювання джерел щодо цифрової трансформації та кібербезпеки в охороні здоров'я. Системний аналіз дозволив розглянути медичну інформацію як критичний ресурс реагування на біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни. Структурно-логічний аналіз застосовано для побудови взаємозв'язку між цифровими компонентами охорони здоров'я,

³Ляшук А. Загрози і виклики для системи кібербезпеки інформаційних систем та реєстрів сфери охорони здоров'я. Публічне управління: концепції, парадигма, розвиток, удосконалення. 2023. № 6. С. 113–121. DOI: <https://doi.org/10.31470/2786-6246-2023-6-113-121>.

⁴Трофименко О., Дубовой Я., Логінова Н., Прокоп Ю., Задерейко О. Аналіз проблем забезпечення кібербезпеки медичних комп'ютерних систем. Захист інформації. 2021. Т. 23, № 1. С. 30–39.

⁵Основи законодавства України про охорону здоров'я: Закон України від 19 листопада 1992 року № 2801-XII. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2801-12> (дата звернення: 20 травня 2026).

⁶Деякі питання ведення Реєстру медичних записів, записів про направлення та рецептів в електронній системі охорони здоров'я: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 28 лютого 2020 року № 587. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0236-20> (дата звернення: 19 травня 2026).

⁷Про затвердження Порядку ведення Реєстру пацієнтів в електронній системі охорони здоров'я: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 30 листопада 2020 року № 2755. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0044-21> (дата звернення: 21 травня 2026).

кіберризиками та клінічними наслідками. Метод моделювання використано для розроблення концептуальної моделі кіберстійкості медичної інформації.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я ЯК ПЕРЕДУМОВА НОВИХ РИЗИКІВ

Цифрова трансформація системи охорони здоров'я охоплює комплексне впровадження цифрових технологій у клінічні, управлінські та комунікаційні процеси. Вона передбачає не лише переведення медичної документації в електронний формат, а й створення цифрової інфраструктури, яка забезпечує обмін, зберігання, аналіз і використання медичних даних для прийняття клінічних та управлінських рішень. До такої інфраструктури належать ЕСОЗ, медичні інформаційні системи, телемедицина, кібербезпека, мережеві сервіси обміну медичними даними, мобільні застосунки, дистанційний моніторинг, штучний інтелект, інтернет речей у медицині, роботизовані системи та аналітичні платформи.

З одного боку, ці інструменти створюють значні можливості для підвищення ефективності медичної допомоги. Електронні медичні записи дозволяють забезпечити безперервність інформації про пацієнта, зменшити дублювання обстежень, покращити доступ до результатів лабораторних та інструментальних досліджень, оптимізувати призначення лікарських засобів і забезпечити кращу координацію між різними фахівцями. Телемедицина розширює доступ до медичних консультацій, особливо для пацієнтів у віддалених, тимчасово переміщених або небезпечних регіонах. Аналітика великих даних і штучний інтелект можуть використовуватися для прогнозування ризиків, підтримки клінічних рішень, моніторингу стану здоров'я населення та управління ресурсами.

З іншого боку, чим глибше цифрові технології інтегруються у систему охорони здоров'я, тим більшою стає залежність медичного закладу від цифрової інфраструктури. Якщо раніше порушення роботи окремого паперового документа мало локальний характер, то в умовах цифрової трансформації збій медичної інформаційної системи, блокування доступу до електронних медичних записів або кібератака на цифрову інфраструктуру може впливати на значну кількість пацієнтів, підрозділів і процесів одночасно. Таким чином, цифровізація створює не лише нові можливості, а й нову поверхню ризику для закладу охорони здоров'я.

Особливо важливим вважаємо і те, що цифрова трансформація в медицині пов'язана з обробкою великих масивів персональних і клінічних даних. Такі можливості є цінними для розвитку доказової медицини, епідеміологічного нагляду та управління якістю медичної допомоги, однак вони одночасно вимагають високого рівня захисту даних, прозорого управління доступами, контролю за використанням інформації та дотримання етичних принципів⁸.

Окрему групу ризиків формує застосування штучного інтелекту та систем підтримки прийняття клінічних рішень. AI-інструменти можуть використовуватися для аналізу складних медичних даних, підтримки клінічних рішень, ранньої діагностики, автоматизації аналізу медичних зображень, оптимізації дозування лікарських засобів і прогнозування побічних реакцій. Водночас їх впровадження потребує правового регулювання, оцінки точності алгоритмів, етичного контролю, прозорості прийняття рішень і захисту персональних даних⁹.

⁸Токар П. Ю. Методи захисту конфіденційності даних пацієнтів у медичних інформаційних системах: аналітичний огляд. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2025. № 3. С. 133–137. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-3-133-137>.

⁹World Health Organization. Ethics and governance of artificial intelligence for health. Geneva: WHO; 2021.

Кібербезпека у цьому контексті стає невід’ємною складовою цифрової трансформації охорони здоров’я. Для медичної сфери конфіденційність, цілісність і доступність даних мають безпосередній клінічний зміст. Конфіденційність означає захист персональних і медичних даних пацієнта; цілісність – недопущення спотворення діагнозів, лабораторних результатів, алергій чи призначень; доступність – можливість своєчасного отримання необхідної інформації для надання медичної допомоги^{10,11}.

МЕДИЧНА ІНФОРМАЦІЯ ЯК КРИТИЧНИЙ РЕСУРС РЕАГУВАННЯ НА ЗАГРОЗИ В УМОВАХ ВІЙНИ

В умовах воєнного стану медична інформація набуває значення критичного ресурсу, від якого залежить безперервність лікування, своєчасність клінічних рішень, безпека пацієнта, координація між закладами охорони здоров’я та ефективність реагування на надзвичайні ситуації. Медичні дані перестають бути лише адміністративним або обліковим ресурсом. Вони стають основою для маршрутизації пацієнтів, організації евакуації, планування хірургічних втручань, призначення фармакотерапії, моніторингу інфекційних ускладнень, контролю антибіотикорезистентності, організації реабілітації та оцінки потреб у лікарських засобах. Окрім клінічного значення, цифрові медичні дані мають управлінську роль, оскільки використовуються для обліку наданих медичних послуг, планування ресурсів, забезпечення безперервності медичної допомоги та реалізації державних гарантій медичного обслуговування населення¹². У контексті реагування системи охорони здоров’я на біологічні, хімічні та екологічні загрози медична інформація є інструментом раннього виявлення, документування, моніторингу та реагування. При біологічних загрозах вона дозволяє відстежувати інфекційні ускладнення, результати мікробіологічних досліджень, поширення мультирезистентних мікроорганізмів, спалахи інфекцій та ефективність антимікробної терапії. При хімічних загрозах медичні дані необхідні для фіксації факту експозиції до токсичних речовин, оцінки клінічних проявів, призначення антидотної або симптоматичної терапії та подальшого спостереження. При екологічних загрозах цифрові медичні дані можуть використовуватися для довготривалого моніторингу наслідків забруднення води, повітря, ґрунту, впливу продуктів горіння, промислових аварій або інших факторів довкілля на здоров’я населення.

До критично важливої медичної інформації в умовах війни можна віднести персональні дані пацієнта, анамнез, характер і механізм травми, діагнози, результати лабораторних та інструментальних досліджень, дані про оперативні втручання, алергії, інфекційний статус, мікробіологічні результати, антибіотикотерапію, використання лікарських засобів високого ризику, реабілітаційний план, функціональний стан пацієнта, потребу в протезуванні чи довготривалому спостереженні.

Водночас використання медичної інформації як критичного ресурсу має здійснюватися з дотриманням принципів захисту персональних даних і лікарської таємниці. Персональні та медичні дані повинні оброблятися відповідно до визначеної законної мети, бути точними, достовірними, адекватними та не надмірними щодо цієї мети. У контексті цифрової трансформації це означає, що навіть за потреби швидкого обміну інформацією між закладами охорони здоров’я необхідно

¹⁰Про захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах: Закон України від 05 липня 1994 року № 80/94-ВР. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80/94-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 18 травня 2026).

¹¹Про основні засади забезпечення кібербезпеки України: Закон України від 05 жовтня 2017 року № 2163-VIII. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text> (дата звернення: 21 травня 2026).

¹²Про державні фінансові гарантії медичного обслуговування населення: Закон України від 19 жовтня 2017 року № 2168-VIII. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2168-19> (дата звернення: 21 травня 2026).

забезпечувати правомірність доступу, обмеження кола користувачів і захист від несанкціонованого поширення чутливих даних.

Особливого значення медична інформація набуває для лікування пацієнтів із бойовими травмами, складними реконструктивними втручаннями, інфекційними ускладненнями та тривалою реабілітацією. У таких пацієнтів клінічні рішення часто залежать від попередньої історії лікування, результатів мікробіологічних досліджень, даних про попереднє застосування антибіотиків, наявності мультирезистентної флори, алергій, побічних реакцій, функції нирок, показників запалення та динаміки ранового процесу. Втрата або недоступність таких даних може призвести до дублювання обстежень, затримки лікування, нераціонального застосування антибіотиків, медикаментозних помилок або неправильного вибору тактики ведення пацієнта.

Медична інформація є також необхідною для організації евакуації та передачі пацієнта між закладами охорони здоров'я. Під час переміщення пацієнта важливо забезпечити передачу даних про діагноз, проведене лікування, оперативні втручання, призначені лікарські засоби, алергії, інфекційний статус, результати обстежень і подальший план лікування. У разі втрати або неповної передачі цієї інформації приймаючий заклад змушений повторно збирати анамнез, дублювати діагностику або приймати рішення в умовах інформаційної невизначеності.

У контексті біологічних загроз медична інформація є основою інфекційного контролю. Дані про мікробіологічні посіви, антибіотикограму, колонізацію мультирезистентними мікроорганізмами, інфекційні ускладнення, ізоляційні заходи та проведену антибіотикотерапію мають значення не лише для окремого пацієнта, а й для безпеки інших пацієнтів і персоналу. Цифрові медичні дані можуть використовуватися для моніторингу поширення інфекцій, аналізу антибіотикорезистентності, контролю спалахів, оцінки ефективності антимікробної терапії та прийняття управлінських рішень щодо інфекційної безпеки. При цьому обмін медичною інформацією для цілей інфекційного контролю, організації лікування або протиепідемічних заходів має здійснюватися в межах законодавчо визначених підстав і з дотриманням вимог щодо лікарської таємниці. Такий підхід дозволяє поєднати потребу в оперативному реагуванні на біологічні загрози із захистом прав пацієнта на конфіденційність медичної інформації.

Дані про можливий вплив токсичних речовин, продуктів горіння, забрудненої води, промислових викидів, радіаційних або інших екологічних факторів можуть бути необхідними для діагностики, спостереження, лікування та довгострокового моніторингу постраждалих. У разі масових інцидентів або надзвичайних ситуацій саме достовірні цифрові дані дозволяють оцінити кількість постраждалих, характер уражень, потребу в медикаментах, антидотах, лабораторному контролю та ресурсах системи охорони здоров'я.

Фармакотерапія в умовах війни також значною мірою залежить від якості й доступності медичної інформації. Дані про призначення лікарських засобів, дози, кратність введення, тривалість лікування, алергічні реакції, побічні реакції, лікарські взаємодії, функцію нирок і печінки, результати терапевтичного моніторингу та ефективність лікування є необхідними для безпечного використання медикаментів. У цифровій системі ці дані можуть використовуватися для зменшення медикаментозних помилок, контролю призначень, підтримки клінічних рішень і фармацевтичної опіки. Узагальнення ролі медичної інформації у реагуванні на біологічні, хімічні та екологічні загрози наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Роль медичної інформації у реагуванні на біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни

Тип загрози	Які медичні дані є критичними	Для чого використовуються	Ризик при втраті, витоку або спотворенні даних
Біологічні загрози	Дані про інфекційний статус, мікробіологічні посіви, антибіотикограму, колонізацію мультирезистентними мікроорганізмами, ізоляційні заходи, антибіотикотерапію	Інфекційний контроль, епідеміологічний нагляд, вибір антимікробної терапії, попередження спалахів	Поширення інфекцій, нераціональна антибіотикотерапія, затримка ізоляційних заходів, ризик для інших пацієнтів і персоналу
Хімічні загрози	Дані про можливу експозицію до токсичних речовин, симптоми ураження, лабораторні показники, призначення антидотів, динаміку стану	Діагностика, вибір лікування, спостереження, оцінка потреби в антидотах і спеціалізованій допомозі	Помилкова оцінка тяжкості стану, затримка лікування, неправильне призначення терапії
Екологічні загрози	Дані про вплив забрудненої води, повітря, ґрунту, продуктів горіння, промислових викидів, радіаційних або інших факторів	Довготривалий моніторинг здоров'я населення, громадське здоров'я, планування ресурсів, профілактика ускладнень	Неможливість оцінити масштаби впливу, втрачений зв'язок між фактором довкілля і станом здоров'я, слабе планування медичної відповіді
Воєнні травми та евакуація	Дані про характер травми, оперативні втручання, крововтрату, інфекційні ускладнення, алергії, фармакотерапію, маршрут пацієнта	Передача пацієнта між закладами, безперервність лікування, реабілітація, протезування	Дублювання обстежень, затримка лікування, медикаментозні помилки, порушення реабілітаційного маршруту
Фармакотерапія в умовах криз	Дані про призначення ЛЗ, дози, взаємодії, алергії, побічні реакції, функцію нирок і печінки	Безпечне застосування ліків, клінічна фармація, попередження медикаментозних помилок	Неправильне дозування, небезпечні взаємодії, повторне призначення препарату при алергії, шкода пацієнту

ОСНОВНІ КІБЕРЗАГРОЗИ ДЛЯ МЕДИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Цифрова трансформація охорони здоров'я супроводжується не лише підвищенням ефективності медичної допомоги, але й формуванням нового спектра інформаційних і кібернетичних ризиків. У галузі охорони здоров'я ці ризики мають особливе значення, оскільки об'єктом захисту є не лише технічна інфраструктура чи програмне забезпечення, а насамперед медична інформація, від якої залежить якість, безпечність і безперервність лікування пацієнта.

До основних напрямів можливих порушень інформаційної безпеки медичних інформаційних систем належать витік даних, втрата даних та несанкціонована модифікація даних. Для медичної сфери класична тріада інформаційної безпеки – конфіденційність, цілісність і доступність – має безпосереднє клінічне значення. Конфіденційність забезпечує захист персональних і медичних даних пацієнта; цілісність гарантує незмінність і достовірність клінічних записів; доступність означає можливість своєчасного отримання необхідної інформації для прийняття клінічних рішень.

Однією з найважливіших загроз є витік медичної інформації, тобто порушення її конфіденційності. Медичні дані містять інформацію про факт звернення за медичною допомогою,

діагнози, результати обстежень, інфекційний статус, хірургічні втручання, призначення лікарських засобів, психоемоційний стан, реабілітаційні потреби та інші чутливі відомості. В умовах воєнного стану витік таких даних може мати не лише етичні та юридичні наслідки, а й створювати ризики для фізичної безпеки пацієнтів, особливо військових, постраждалих від бойових дій, внутрішньо переміщених осіб або інших вразливих категорій.

Другою критичною загрозою є втрата медичних даних. Втрата інформації може бути наслідком технічного збою, кібератаки, шкідливого програмного забезпечення, помилки персоналу, неналежного резервного копіювання або руйнування інфраструктури внаслідок бойових дій. У клінічному вимірі втрата даних означає відсутність доступу до анамнезу, алергій, попередньої антибіотикотерапії, результатів лабораторних досліджень, даних про оперативні втручання чи реабілітаційний план.

Третьою загрозою є несанкціонована модифікація медичних даних, тобто порушення їх цілісності. Така модифікація може стосуватися діагнозів, лабораторних показників, алергій, доз лікарських засобів, режимів антибіотикотерапії, записів про введення препаратів або результатів мікробіологічних досліджень. На відміну від простого витоку інформації, спотворення медичних записів може безпосередньо спричинити неправильне клінічне рішення.

Окрему групу складають атаки типу *DoS / DDoS*, спрямовані на порушення доступності цифрових сервісів. Для закладу охорони здоров'я це означає ризик втрати доступу до медичної інформаційної системи (МІС), електронних медичних записів, результатів обстежень, електронних призначень або інших критичних цифрових сервісів. В умовах війни недоступність МІС може порушити маршрутизацію пацієнтів, надання невідкладної допомоги, ведення антибіотикотерапії та передачу пацієнтів між закладами.

Важливим джерелом кіберризиків залишається людський фактор. У медичному закладі він може проявлятися у використанні слабких паролів, передачі облікових даних іншим особам, відкритті фішингових листів, роботі з незахищених пристроїв, залишенні відкритого доступу до МІС, надсиланні медичних даних через неофіційні канали комунікації або введенні персональних даних у неперевірені цифрові сервіси.

Особливо небезпечним механізмом реалізації людського фактору є фішинг. Фішингові атаки можуть бути спрямовані на отримання логінів, паролів, електронних підписів або доступу до внутрішніх систем закладу. В умовах високого навантаження на медичних працівників, дефіциту часу, воєнного стану та постійної роботи з електронними повідомленнями й документами ризик фішингу зростає. Саме тому кібергігієна персоналу має розглядатися як обов'язкова складова безпеки пацієнта, а не лише як технічне навчання.

Ще однією загрозою є несанкціонований доступ до медичної інформації. Він може виникати через надмірні права користувачів, відсутність регулярного перегляду ролей доступу, використання спільних облікових записів, недостатній контроль за діями користувачів або порушення процедур автентифікації. З організаційної точки зору, профілактика таких ризиків потребує не лише технічних засобів захисту, а й внутрішніх нормативних документів закладу охорони здоров'я: політик, регламентів, інструкцій і процедур, які визначають мету та підстави обробки персональних даних, порядок доступу до них, строки й умови зберігання, процедури зміни, видалення або знищення даних, а також заходи захисту й порядок фіксації операцій, пов'язаних з обробкою персональних даних.

В умовах впровадження штучного інтелекту з'являється додатковий напрям ризиків. AI-інструменти можуть використовуватися для аналізу клінічних даних, підтримки прийняття рішень,

CHAPTER 3. SAFETY, RISK MANAGEMENT, AND EMERGENCY RESPONSE

прогнозування ризиків, оптимізації дозування лікарських засобів або адміністративної аналітики. Водночас неконтрольоване використання відкритих або неперевірених AI-сервісів може створювати ризик витоку персональних даних, формування помилкових рекомендацій, не прозорості алгоритмічного рішення або надмірної довіри до автоматизованого висновку. Узагальнення цифрових компонентів охорони здоров'я та пов'язаних із ними кіберризиків наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Цифрові компоненти охорони здоров'я та пов'язані кіберризики в умовах війни

Цифровий компонент	Функціональне значення	Потенційний кіберризик	Можливі наслідки в умовах війни
MIC / ECO3	Ведення електронної медичної документації, доступ до даних пацієнта	Несанкціонований доступ, блокування, втрата даних	Порушення безперервності лікування, неможливість швидкого прийняття клінічних рішень
EHR (Electronic Health Record) / електронні медичні записи	Збереження анамнезу, діагнозів, призначень, алергій, лабораторних даних	Спотворення або видалення записів	Помилки у лікуванні, ризик неправильного призначення лікарських засобів
Телемедицина	Дистанційні консультації, підтримка пацієнтів у віддалених або небезпечних регіонах	Незахищений канал зв'язку, перехоплення даних	Витік медичної інформації, зниження довіри до дистанційної допомоги
Big Data	Аналітика, прогнозування, епідеміологічний нагляд, управління ресурсами	Повторна ідентифікація пацієнтів, неконтрольований доступ до масивів даних	Розкриття чутливої інформації про групи пацієнтів або медичні заклади
Штучний інтелект	Підтримка клінічних і управлінських рішень	Помилкові рекомендації, непрозорість алгоритму, витік даних у зовнішні сервіси	Ризик клінічної помилки, порушення конфіденційності
IoT (Internet of Things) / медичні пристрої	Моніторинг стану пацієнта, дистанційний контроль показників	Втручання в роботу пристрою, передача даних через незахищені мережі	Хибні клінічні сигнали, ризик для безпеки пацієнта
Електронні рецепти / e-направлення	Оптимізація маршруту пацієнта та призначень	Несанкціонована зміна або блокування	Затримка лікування, помилки у фармакотерапії

Клінічне значення основних компонентів інформаційної безпеки медичних даних представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Тріада інформаційної безпеки медичних даних та її клінічне значення

Компонент інформаційної безпеки	Що означає для медичної інформації	Приклад порушення	Потенційний клінічний наслідок
Конфіденційність	Захист персональних і медичних даних від несанкціонованого доступу	Витік діагнозів, даних про травми, результатів обстежень, інфекційного статусу	Порушення прав пацієнта, ризик стигматизації, загроза безпеці військових або постраждалих
Цілісність	Захист даних від несанкціонованої зміни, спотворення або видалення	Зміна призначення, алергії, результату лабораторного аналізу, антибіотикограми	Неправильне лікування, медикаментозна помилка, ризик шкоди пацієнту
Доступність	Можливість своєчасного доступу до даних для надання допомоги	Блокування MIC, DDoS, ransomware, відсутність доступу до історії хвороби	Затримка лікування, порушення маршрутизації, зниження якості медичної допомоги

Аналіз тріади інформаційної безпеки дозволяє розглядати кіберризики медичної інформації не лише як технічні порушення, а як фактори, що можуть мати безпосередні клінічні, організаційні та управлінські наслідки. Порушення конфіденційності призводить до розкриття чутливих персональних і медичних даних; порушення цілісності створює ризик спотворення клінічної інформації та прийняття помилкових медичних рішень; порушення доступності унеможливорює своєчасне використання даних для лікування, евакуації, інфекційного контролю або реагування на надзвичайні ситуації.

За умов воєнного стану ці ризики посилюються через підвищене навантаження на заклади охорони здоров'я, потребу в швидкому обміні інформацією між різними рівнями медичної допомоги, загрозу цілеспрямованих кібератак, перебої в роботі цифрової та енергетичної інфраструктури, а також активне використання зовнішніх цифрових сервісів. Тому для практичного управління кібербезпекою доцільно класифікувати загрози за їх походженням, об'єктом впливу, потенційними наслідками для закладу охорони здоров'я та можливими заходами реагування. Такий підхід дозволяє перейти від загального розуміння інформаційної безпеки до формування конкретних управлінських і технічних рішень, спрямованих на захист медичної інформації та підтримання безперервності медичної допомоги.

Основні групи загроз медичній інформації в умовах війни наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Класифікація загроз медичній інформації в умовах війни

Група загроз	Приклади	Об'єкт впливу	Наслідки для закладу охорони здоров'я	Заходи реагування
Технічні	DDoS, malware, ransomware, збій серверів	МІС, ЕСОЗ, мережі, бази даних	Недоступність систем, втрата або блокування даних	Резервне копіювання, сегментація мережі, антивірусний захист, план аварійного відновлення
Організаційні	Відсутність політики інформаційної безпеки, нечіткі ролі, слабкий контроль доступів	Управлінські процеси закладу охорони здоров'я	Неконтрольоване використання даних, затримка реагування на інциденти	Політика інформаційної безпеки, аудит доступів, визначення відповідальних осіб
Людський фактор	Фішинг, слабкі паролі, передача логінів, помилки персоналу	Користувачі МІС	Витік, втрата або спотворення даних	Навчання, кібергігієна, багатофакторна автентифікація, інструкції для персоналу
Воєнні	Цілеспрямовані атаки на медичну інфраструктуру, руйнування цифрової або енергетичної інфраструктури	Заклади охорони здоров'я, державні реєстри, пацієнтські дані	Дестабілізація роботи, паніка, порушення безперервності допомоги	Кризовий план, резервні процеси, автономні канали зв'язку, взаємодія з державними структурами
AI-ризик	Введення персональних даних у зовнішні AI-сервіси, помилкові рекомендації	Клінічні та управлінські рішення	Витік даних, помилкові рішення, надмірна довіра до алгоритму	Політика використання AI, заборона персональних даних у відкритих сервісах, людська перевірка рекомендацій

Наведена класифікація демонструє, що кіберзагрози медичній інформації мають багаторівневий характер і не можуть бути усунуті лише технічними засобами. Їх ефективне управління потребує поєднання організаційних рішень, технологічного захисту, навчання персоналу, клінічного контролю та готовності до кризових ситуацій. Саме тому доцільним є

формування концептуальної моделі кіберстійкості медичної інформації, яка поєднує управлінський, технічний, клінічний і безпековий напрямки.

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ КІБЕРСТІЙКОСТІ МЕДИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

З огляду на комплексний характер цифрової трансформації охорони здоров'я та зростання кіберризиків, доцільним є формування концептуальної моделі кіберстійкості медичної інформації в умовах війни. Така модель має поєднувати, на нашу думку, не лише технічні засоби захисту, а й організаційні, кадрові, клінічні, кризові та етичні механізми управління цифровими ризиками.

Кіберстійкість медичної інформації можна розглядати як здатність закладу охорони здоров'я забезпечувати конфіденційність, цілісність і доступність медичних даних, підтримувати безперервність клінічних процесів, своєчасно реагувати на кіберінциденти та відновлювати роботу цифрової інфраструктури без критичного впливу на безпеку пацієнта.

Центральним об'єктом запропонованої моделі є медична інформація як критичний ресурс системи охорони здоров'я. До неї належать персональні дані пацієнта, діагнози, результати лабораторних та інструментальних досліджень, дані про інфекційний статус, алергії, призначення лікарських засобів, антибіотикотерапію, оперативні втручання, реабілітаційний маршрут, дані телемедицини та інформація, що може використовуватися для аналітики або штучного інтелекту.

Узагальнення наведених ризиків свідчить, що кібербезпека медичної інформації має міждисциплінарний характер і перебуває на перетині інформаційної безпеки, клінічного управління, громадського здоров'я, біологічної безпеки, фармакотерапії та кризового менеджменту. Тому оцінка кіберризиків у закладі охорони здоров'я повинна враховувати не лише ймовірність технічного інциденту, а й потенційний клінічний вплив на пацієнта, персонал, епідеміологічну ситуацію та здатність закладу функціонувати в умовах війни.

Запропонована нами модель включає сім взаємопов'язаних рівнів: стратегічний, організаційний, технологічний, кадровий, клініко-безпековий, воєнно-кризовий та AI-рівень.

Перший рівень – стратегічний. Він передбачає включення кібербезпеки медичної інформації до загальної стратегії розвитку та стійкості закладу охорони здоров'я. На цьому рівні мають бути визначені політика інформаційної безпеки, відповідальність керівництва, пріоритети захисту критичних даних, порядок оцінки ризиків і взаємозв'язок кібербезпеки з управлінням якістю та безпекою пацієнта.

Другий рівень – організаційний. Він охоплює розподіл ролей і відповідальності, управління доступами, регламенти роботи з МІС, порядок повідомлення про інциденти, аудит дій користувачів і внутрішній контроль дотримання правил інформаційної безпеки. На цьому рівні мають бути запроваджені внутрішні документи закладу охорони здоров'я — політики, регламенти, інструкції та процедури, що визначають мету й підстави обробки персональних і медичних даних, порядок доступу до них, строки та умови зберігання, процедури зміни, видалення або знищення даних, а також порядок фіксації операцій, пов'язаних з їх обробкою. Важливою умовою реалізації організаційного рівня є визначення відповідальної особи або створення окремого структурного підрозділу в закладі охорони здоров'я, який організовує роботу, пов'язану з кіберзахистом персональних і медичних даних, координує внутрішні політики, контролює управління доступами, бере участь у реагуванні на інциденти та організовує навчання персоналу з питань кібергігієни.

Третій рівень – технологічний. Він включає застосування технічних засобів захисту: багатофакторної автентифікації, кваліфікованого електронного підпису (КЕП), шифрування,

журналювання дій користувачів, резервного копіювання, антивірусного захисту, контролю мережевого доступу, сегментації мережі та планів відновлення після збоїв.

Четвертий рівень – кадровий. Він передбачає формування цифрової культури та кібергігієни персоналу. Для медичного закладу це означає регулярне навчання працівників щодо фішингу, безпечного використання паролів, правил роботи з медичними даними, недопущення передачі облікових записів і коректного використання цифрових сервісів. Практична реалізація кадрового рівня має включати не лише загальне інформування персоналу, а й регулярне навчання конкретним правилам безпечної цифрової поведінки: використанню складних і унікальних паролів, забороні передачі паролів та кваліфікованого електронного підпису іншим особам, блокуванню робочого комп'ютера при відході від робочого місця, уникненню публічних Wi-Fi-мереж для робочих завдань, обережності при роботі з електронною поштою та вкладеннями, а також недопущенню використання невідомих зовнішніх носіїв інформації. Такі заходи зменшують ризики, пов'язані з людським фактором, фішингом і несанкціонованим доступом до медичних даних.

П'ятий рівень – клініко-безпековий. Він відображає зв'язок кібербезпеки з безпекою пацієнта. На цьому рівні визначаються критичні клінічні дані, доступ до яких має бути гарантований навіть у разі цифрових збоїв: алергії, життєво важливі призначення, антибіотикотерапія, результати критичних лабораторних показників, інфекційний статус, дані про оперативні втручання та план лікування. Для забезпечення безперервності медичної допомоги доцільно передбачити внутрішні процедури збереження, резервного доступу та оперативного відновлення мінімального набору критичної клінічної інформації, необхідної для прийняття невідкладних рішень щодо лікування, евакуації, інфекційного контролю та фармакотерапії.

Шостий рівень – воєнно-кризовий. Він передбачає готовність закладу охорони здоров'я до роботи в умовах кібератак, відключення МІС, руйнування інфраструктури, перебоїв електропостачання або зв'язку. Цей рівень має включати резервні алгоритми роботи, паперові або локальні форми критичної документації, плани відновлення доступу до даних, порядок передачі пацієнта при недоступності цифрових систем та взаємодію з відповідальними державними структурами. Воєнно-кризовий рівень має передбачати не лише технічне відновлення роботи МІС, а й заздалегідь визначений план дій у разі несанкціонованого доступу до персональних або медичних даних, пошкодження технічного обладнання, втрати доступу до електронної системи охорони здоров'я чи інших надзвичайних ситуацій. Такий план повинен визначати порядок повідомлення відповідальних осіб, тимчасові резервні способи документування критичних клінічних даних, відновлення доступу, мінімізацію шкоди для пацієнтів і подальший аналіз інциденту.

Сьомий рівень – AI-рівень. Він стосується безпечного, етичного та контрольованого використання штучного інтелекту. Цей рівень має передбачати заборону введення ідентифікованих персональних і медичних даних у неперевірені зовнішні AI-сервіси, обов'язкову людську перевірку AI-рекомендацій, оцінку достовірності алгоритмів, прозорість використання AI-інструментів і відповідальність фахівця за кінцеве клінічне рішення (рис. 1).

Рівень моделі	Зміст	Основне завдання
 Стратегічний	Політика інформаційної безпеки, управління ризиками, відповідальність керівництва	Інтегрувати кібербезпеку в загальну стратегію стійкості закладу охорони здоров'я
 Організаційний	Ролі, доступи, регламенти, аудит, управління інцидентами	Забезпечити контрольоване та безпечне використання МІС
 Технологічний	Багатофакторна автентифікація, КЕП, журналювання, резервне копіювання, шифрування	Підтримувати конфіденційність, цілісність і доступність даних
 Кадровий	Навчання персоналу, кібергігієна, протидія фішингу	Зменшити ризики, пов'язані з людським фактором
 Клініко-безпечний	Доступ до критичних даних для лікування, інфекційного контролю, фармакотерапії та реагування на загрози	Пов'язати кібербезпеку з безпекою пацієнта та громадським здоров'ям
 Воєнно-кризовий	План дій при відключенні МІС, резервні форми, передача пацієнтів, відновлення доступу	Забезпечити безперервність роботи закладу охорони здоров'я під час кібератак, бойових, дій або надзвичайних ситуацій
 AI-рівень	Безпечне й етичне використання штучного інтелекту	Запобігти витоку даних і помилковим AI-рекомендаціям

Рисунок 1. Концептуальна модель кіберстійкості медичної інформації, сформована авторами на основі опрацьованих джерел

Таким чином, кібербезпека медичної інформації в умовах війни є складовою не лише цифрової трансформації, а й біологічної, хімічної та екологічної безпеки. Захищені, достовірні та доступні медичні дані необхідні для інфекційного контролю, епідеміологічного нагляду, реагування на хімічні ураження, оцінки наслідків екологічних факторів, безпечної фармакотерапії, евакуації та реабілітації пацієнтів. Тому, кібербезпека має бути інтегрована в систему управління якістю, безпеки пацієнта, громадського здоров'я та кризової стійкості закладу охорони здоров'я.

ВИСНОВКИ

Цифрова трансформація охорони здоров'я є необхідною умовою розвитку сучасної медичної системи, підвищення доступності, якості та ефективності медичної допомоги. Водночас активне впровадження медичних інформаційних систем, електронних медичних записів, телемедицини, аналітики великих даних, штучного інтелекту та інших цифрових інструментів формує нові ризики для конфіденційності, цілісності та доступності медичної інформації.

В умовах війни медична інформація набуває значення критичного ресурсу для лікування, евакуації, інфекційного контролю, епідеміологічного нагляду, фармакотерапії, реабілітації, управління ресурсами та забезпечення безперервності медичної допомоги. Її витік, втрата, спотворення або недоступність можуть мати не лише правові чи організаційні наслідки, а й безпосередньо впливати на безпеку пацієнта.

У межах реагування на біологічні загрози захищені медичні дані необхідні для контролю інфекційних ускладнень, моніторингу антибіотикорезистентності, виявлення мультирезистентних мікроорганізмів та запобігання спалахам. У контексті хімічних загроз вони забезпечують

документування експозиції, оцінку клінічних проявів і вибір лікувальної тактики. При екологічних загрозах цифрові медичні дані є основою для довготривалого моніторингу впливу факторів довкілля на здоров'я населення.

Основними кіберзагрозами для медичної інформації є витік даних, втрата інформації, несанкціонована модифікація медичних записів, DDoS-атаки, шкідливе програмне забезпечення, фішинг, несанкціонований доступ, людський фактор і неконтрольоване використання штучного інтелекту. Ці загрози мають розглядатися не ізольовано, а як частина загальної системи управління ризиками закладу охорони здоров'я.

Запропонована концептуальна модель кіберстійкості медичної інформації включає сім рівнів: стратегічний, організаційний, технологічний, кадровий, клініко-безпековий, воєнно-кризовий та AI-рівень. Така структура дозволяє розглядати кібербезпеку як комплексну управлінську, клінічну, етичну та кризову систему захисту медичних даних.

Кібербезпека медичної інформації має бути інтегрована в систему управління якістю, безпекою пацієнта, громадським здоров'ям та кризовою стійкістю закладу охорони здоров'я. У сучасних умовах вона є необхідною передумовою безперервності лікування, довіри до цифрової медицини та здатності медичної системи ефективно реагувати на виклики війни, біологічні, хімічні й екологічні загрози.

КОНЦЕПЦІЯ ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ВІД ТЕХНОГЕННИХ ТА ВОЄННИХ ЗАГРОЗ НА ОСНОВІ ЦИФРОВОЇ ТІНІ ТА ЦИФРОВОГО ФАНТОМУ

CONCEPT OF PROTECTING HIGH-RISK FACILITIES FROM TECHNOGENIC AND MILITARY THREATS BASED ON A DIGITAL SHADOW AND A DIGITAL PHANTOM

Савченко Олександр Віталійович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний університет цивільного захисту України, savchenko@nuczu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1305-7415>

Стацюк Анна Андріївна, здобувач вищої освіти, Національний університет цивільного захисту України, statsiuk.anna_2023b@nuczu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0001-2629-1083>

Гарькава Неля Олександрівна, здобувач вищої освіти, Національний університет цивільного захисту України, harkava.nelia_2023b@nuczu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0001-9565-4036>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.25>

Анотація. У розділі обґрунтовано концепцію дворівневого захисту об'єктів підвищеної небезпеки (ОПН) в умовах збройного конфлікту. Концепція поєднує технологію цифрової тіні для превентивного моніторингу технологічних ризиків і технологію цифрового фантому для активного управління сигнатурою об'єкта з метою відводу засобів повітряного нападу. Обидва компоненти функціонують на єдиній сенсорній платформі за принципом подвійного використання інфраструктури. Систему побудовано за модульним масштабованим принципом, придатним для різних типів і розмірів ОПН. Концепцію верифіковано на двох типах ОПН — нафтосховищі та трансформаторній підстанції. Наведено порівняльний економічний аналіз альтернативних підходів.

Ключові слова: цифрова тінь, цифровий фантом, об'єкти підвищеної небезпеки, інженерний захист, мультиспектральна імітація, цивільний захист, збройний конфлікт, техногенна безпека.

Abstract. This chapter substantiates a concept of two-level protection for hazardous industrial facilities (HIF) under armed conflict conditions. The concept combines digital shadow technology for preventive monitoring of technological risks with digital phantom technology for active signature management aimed at deflecting aerial attack means. Both components operate on a unified sensor platform implementing a dual-use infrastructure principle. The system is built on a modular scalable architecture, suitable for HIFs of various types and sizes. The concept is verified using two HIF types — an oil storage facility and a power substation. A comparative economic analysis of alternative approaches is provided.

Keywords: digital shadow, digital phantom, hazardous industrial facility, engineering protection, multispectral simulation, civil protection, armed conflict, industrial safety.

1. ВСТУП

3 лютого 2022 року об'єкти підвищеної небезпеки (ОПН) України — нафтосховища, трансформаторні підстанції, хімічні підприємства, водоочисні станції — опинились під одночасним

впливом двох незалежних класів загроз. Перший клас — внутрішній: умови воєнного часу порушують штатний режим експлуатації, спричиняючи деградацію обладнання, накопичення прихованих дефектів і підвищення ймовірності технологічної аварії. Другий клас — зовнішній: ті самі об'єкти є пріоритетними цілями для засобів повітряного нападу (ЗПН) противника. Ураження ОПН будь-якого типу спричиняє хімічні та екологічні наслідки регіонального масштабу.

1) внутрішньовиробнича (операційна) деградація: обумовлена форс-мажорними обставинами воєнного часу, що призводять до системного порушення планово-профілактичних ремонтів, нестабільності енергетичних мереж та кадрового голоду;

2) зовнішня мілітарна загроза: спричинена систематичним застосуванням засобів повітряного нападу (ЗПН) по критичній інфраструктурі, де ОПН виступають першочерговими цілями.

Синергетичний ефект ураження хоча б одного з елементів структури ОПН створює передумови для масштабного екологічного колапсу та вторинного хімічного ураження навколишнього природного середовища у межах цілих географічних регіонів.

Кількісний вимір загрози підтверджується даними міжнародних організацій. За даними МЕА, лише за перші 27 місяців повномасштабного вторгнення пошкоджено або знищено 18 великих ТЕЦ, 815 котелень та 354 км теплових мереж; прямі збитки від ударів по тепловій інфраструктурі перевищили 2,4 млрд дол. США¹. Нафтосховища стали найбільш часто атакованою категорією ОПН: з 2022 року пошкоджено або знищено щонайменше 32 великі нафтобази з прямими втратами 266 млн дол.². Лише внаслідок пожеж на нафтосховищах в атмосферне повітря потрапило понад 499 тисяч тонн токсичних речовин³. Загальний екологічний збиток перевищує 127 млрд дол., зафіксовано понад 9 000 випадків екологічних руйнувань². За даними SIPRI, лише з лютого по грудень 2022 зафіксовано понад 1 100 інцидентів пошкодження промислових об'єктів та критичної інфраструктури⁴.

Масштаб ударів за об'єктами енергетичної інфраструктури є безпрецедентним: у жовтні 2022 — квітні 2023 р. фіксувалося понад 7 подій пошкодження об'єктів генерації та передачі електроенергії на тиждень; 8 травня 2024 р. за один день уражено майже 12 об'єктів⁵. Наведені дані підтверджують, що ОПН в умовах збройного конфлікту потребують якісно нових підходів до захисту — таких, що одночасно охоплюють технологічний моніторинг і зниження зовнішньої вразливості, тоді як чинні нормативні та проектні рішення орієнтовані лише на один із цих аспектів.

Наявні підходи до захисту ОПН орієнтовано або на мирний час — технологічний нагляд, планові перевірки — або на суто воєнні умови у вигляді пасивних фізичних споруд. Жоден із них не забезпечує одночасного захисту від обох складових загрози. Технології цифрових двійників і

¹ International Energy Agency (IEA), 'Ukraine's Energy Security and the Coming Winter: Ukraine's Energy System Under Attack' (IEA, Paris 2024) <<https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter>> accessed 18 May 2026.

² Human Rights Research, 'Counting the Cost: The Environmental Toll on Ukraine from the Russian Invasion' (2025) <<https://www.humanrightsresearch.org/post/counting-the-cost-the-environmental-toll-on-ukraine-from-the-russian-invasion>> accessed 18 May 2026.

³ Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 'Масштаби шкоди, завданої довкіллю України від агресії РФ, вражають весь світ' (Кабінет Міністрів України, Київ 2022) <<https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkilliya-masshtabi-shkodi-zavdanoyi-dovkillyu-ukrayini-vid-agresiyi-rf-vrazhayut-ves-svit>> accessed 18 May 2026.

⁴ Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI), 'Environmental Accountability, Justice and Reconstruction in the Russian War on Ukraine' (SIPRI, Stockholm 2023) <<https://www.sipri.org/commentary/topical-backgroundunder/2023/environmental-accountability-justice-and-reconstruction-russian-war-ukraine>> accessed 18 May 2026.

⁵ United Nations Security Council, 'Escalating Attacks on Ukraine's Civilian, Energy Infrastructure Making Humanitarian Aid Delivery Even More Dangerous, Relief Chief Tells Security Council' (UN, New York 2024) <<https://press.un.org/en/2024/sc15695.doc.htm>> accessed 18 May 2026.

тіней — *Digital Shadow* та *Digital Twin* — широко застосовуються в промисловому моніторингу, однак у контексті активного захисту сигнатури стаціонарних цивільних ОПН залишаються практично нерозробленими.

Мета розділу — обґрунтування концепції дворівневого захисту ОПН, що поєднує технологію цифрової тіні для превентивного управління внутрішніми ризиками та технологію цифрового фантому для активного зниження зовнішньої вразливості об'єкта. Концепція реалізується на єдиній масштабованій модульній платформі за принципом подвійного використання сенсорної інфраструктури.

2. МЕТОДОЛОГІЯ

2.1. Класифікація загроз ОПН в умовах збройного конфлікту

Загрози ОПН в умовах збройного конфлікту класифікуються за джерелом і механізмом виникнення. Внутрішні загрози зумовлені деградацією технічного стану обладнання: зниження якості та регулярності технічного обслуговування, перевантаження через зміну режимів роботи, розвиток корозійних процесів, кадровий дефіцит кваліфікованого персоналу. Реалізація внутрішніх загроз призводить до аварій, пожеж та розливів небезпечних речовин без будь-якого зовнішнього впливу.

Зовнішні загрози зумовлені прицільними ударами ЗПН по об'єктах інфраструктури. Сучасні ЗПН оснащені комбінованими системами наведення — радіолокаційними, тепловими та оптико-електронними головками самонаведення (ГСН), — що уможлиблює ідентифікацію цілі за сукупністю фізичних сигнатур навіть за наявності засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ)⁶. Ключова вразливість стаціонарних ОПН — стабільна та добре відома теплова і радіолокаційна сигнатура. Теплова сигнатура об'єкта характеризується спектральною яскравістю у діапазоні 3–5 мкм та 8–12 мкм і є функцією температури поверхні, її емісійної здатності та геометрії об'єкта. Радіолокаційна сигнатура визначається ефективною поверхнею розсіювання (ЕПР), що залежить від форми об'єкта, матеріалу облицювання та кута опромінення. Для промислових резервуарів та трансформаторного обладнання ці параметри практично постійні у часі, що суттєво спрощує алгоритми цілевказівки ГСН.

Обидві категорії загроз є незалежними, але взаємопов'язаними: технічна деградація підвищує ризик вторинної аварії після удару; удар по обладнанню в незадовільному технічному стані призводить до значно тяжчих наслідків. Зазначений феномен відповідає концепції каскадного відмовного ефекту (*cascade failure effect*): первинне ушкодження одного елемента системи ініціює послідовний ланцюг відмов суміжних підсистем, наслідки яких сумарно перевищують шкоду від безпосереднього впливу. Концепція дворівневого захисту спрямована на одночасне зниження ризику від обох категорій загроз за допомогою єдиної технологічної платформи.

Кількісна характеристика каскадного відмовного ефекту виражається через коефіцієнт підсилення збитку (*damage amplification ratio, DAR*) — відношення сукупних наслідків каскадної відмови до збитків від первинного впливу. Для пожеж на нафтосховищах, що виникають унаслідок попереднього пошкодження від ЗПН, значення DAR становить від 2,8 до 7,4: ураження одного резервуара провокує займання сусідніх через теплове випромінювання та розлив пального, кратно збільшуючи масштаб хімічного забруднення атмосфери. Аналогічна закономірність спостерігається для підстанцій: руйнування одного силового трансформатора спричиняє каскадне перевантаження та відмову суміжних вузлів енергосистеми, що підтверджується масовими відключеннями

⁶ P Trzaskawka, 'System for Critical Infrastructure Security Based on Multispectral Observation-Detection Module' (2013) 8896 Proceedings of SPIE <<https://doi.org/10.1117/12.2028740>>.

електропостачання після цілеспрямованих ударів у 2022–2024 рр. Це обумовлює методологічний принцип концепції: захист від каскадних відмов ефективніший, якщо спрямований на превенцію першої відмови в ланцюгу, а не на ліквідацію наслідків її розповсюдження.

2.2. Огляд існуючих підходів та їх обмеження

Традиційні методи захисту ОПН поділяються на дві групи. Перша — системи моніторингу та управління ризиками мирного часу: планові огляди, інструментальна діагностика, ручне внесення даних до систем обліку. Принципове обмеження — дискретний характер контролю: між перевітками можуть розвиватися критичні дефекти, тоді як в умовах воєнного часу регулярність перевірок суттєво знижується.

Друга група — пасивні засоби фізичного захисту від ЗПН. У монографії⁷ систематизовано підходи до інженерного захисту ключових елементів (КЕ) ОПН від засобів повітряного нападу та проведено порівняльну оцінку їх ефективності. Розглянуто весь спектр конструктивних рішень — від ґрунтових валів та ґабіонових насипів до просторових захисних каркасів та підвісних ланцюгових екранів. Для кожного варіанта визначено ступінь захисту від прямого ураження, зниження ефективної поверхні розсіювання та захист від уламкового впливу. Зазначена монографія є єдиним комплексним вітчизняним дослідженням у цій галузі і є базою для порівняльного аналізу в цьому розділі.

В роботі⁸ систематизовано вісім основних варіантів конструктивних рішень для типового КЕ ОПН з габаритами 20×20 м та висотою 3 м; порівняльний аналіз наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика засобів пасивного захисту КЕ ОПН (об'єкт 20×20 м, висота 3 м)

Варіант захисту	Орієнтовна вартість	Час розгортання
Перешкоди з контейнерів/вагонів	від 1,2 млн грн	3–5 діб
Збірні перешкоди з біг-бегів / ґабіонів	від 0,6 млн грн	2–4 доби
Укриття типу «Саркофаг»	від 4,5 млн грн	10–14 діб
Підвісні ланцюгові екрани	від 0,8 млн грн	5–7 діб
Металеві опори з геотекстильною сіткою	від 0,4 млн грн	2–3 доби
Просторові захисні каркаси з сітками	від 0,7 млн грн	4–6 діб
Кутові відбивачі	від 0,15 млн грн	1–2 доби
Захисні перешкоди з ґрунтових валів	від 0,9 млн грн	5–8 діб

Джерело: складено авторами на основі⁹

Фундаментальне обмеження всіх наведених варіантів — пасивний характер: вони можуть знизити ступінь фізичного ураження при влучанні, але не усувають головної вразливості. Радіолокаційна та

⁷ А С Білик та ін, Основи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України від засобів повітряного нападу противника: монографія (Київ 2023) 232.

⁸ О В Савченко, Н О Гарькава, А А Стацюк, 'Активна мультиспектральна імітація як метод інженерного захисту об'єктів енергетики від засобів повітряного нападу' [2026] Матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. «Цивільний захист в умовах війни» (ЛДУБЖД, Львів 2026) 6.

⁹ О В Савченко, Н О Гарькава, А А Стацюк, 'Активна мультиспектральна імітація як метод інженерного захисту об'єктів енергетики від засобів повітряного нападу' [2026] Матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. «Цивільний захист в умовах війни» (ЛДУБЖД, Львів 2026) 6.

теплова сигнатура КЕ залишається видимою для мультиспектральних ГСН навіть за наявності периметральних перешкод. Жоден із варіантів не вирішує проблеми внутрішнього технологічного ризику. Наявні підходи є взаємно ізольованими: кожен усуває лише одну складову загрози.

2.3. Концепція єдиної сенсорної платформи подвійного призначення

Методологічну основу концепції становить єдина сенсорна інфраструктура для одночасного вирішення двох задач: превентивного моніторингу технологічного стану ОПН та формування актуального сигнатурного профілю об'єкта для управління активними імітаційними модулями.

Мережа сенсорів, розміщена на ОПН, безперервно збирає дані про параметри роботи обладнання (температура, тиск, рівень рідини, вібрація, електромагнітне поле). Ці дані одночасно надходять до двох функціональних блоків: блоку аналізу технологічного стану (цифрова тінь) та блоку формування сигнатурного профілю (основа для цифрового фантому). Перший виявляє відхилення від норми і генерує попередження про зростання техногенного ризику. Другий забезпечує активні імітаційні модулі актуальними параметрами сигнатури об'єкта в режимі реального часу. При отриманні сигналу повітряної тривоги імітаційні модулі автоматично активуються, відтворюючи сигнатуру реального об'єкта на безпечній відстані від нього.

Принципова перевага такої архітектури — інфраструктурна економія: сенсорна мережа, необхідна для цифрової тіні, є тією ж мережею, що забезпечує роботу цифрового фантому. Капіталовкладення в один компонент автоматично підвищують ефективність іншого. Одна інфраструктура захищає від двох незалежних класів загроз, знижуючи сукупні витрати на розгортання системи.

Дослідження виконано із застосуванням комплексу взаємодоповнювальних методів. Концептуальне моделювання використано для формування архітектури єдиної сенсорної платформи та опису взаємодії між її функціональними блоками. Порівняльний аналіз проводився за чотирма критеріями: повнота охоплення загроз (внутрішня / зовнішня), адаптивність до масштабу об'єкта, час розгортання активного захисту та питомі витрати на одиницю захищеного периметра. Оцінювались вісім варіантів пасивного захисту та три конфігурації цифрового моніторингу / імітації (таблиці 1–3). Системний підхід застосовано для виявлення функціональних зв'язків між компонентами платформи та обґрунтування принципу подвійного використання інфраструктури. Техніко-економічний аналіз виконано методом порівняння витрат за сценаріями: роздільне розгортання двох систем проти єдиної платформи подвійного призначення.

Сенсорна інфраструктура платформи подвійного призначення ґрунтується на стандартизованих промислових протоколах передачі даних: Modbus TCP/IP для провідного з'єднання та LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) для бездротового зв'язку в умовах пошкодження кабельних комунікацій. Протокол LoRaWAN забезпечує дальність передачі до 15 км в режимі прямої видимості та до 5 км у міській забудові при споживанні потужності менше 100 мВт — що відповідає умовам роботи від автономного акумуляторного живлення. Архітектура мережі передбачає ієрархічну структуру: польові сенсорні вузли (рівень 1) — концентратори даних (рівень 2) — центральний сервер обробки та прийняття рішень (рівень 3). Ієрархічна організація забезпечує часткову функціональність системи навіть при виведенні з ладу окремих вузлів мережі, що є критично важливим в умовах активних бойових дій.

3. РЕЗУЛЬТАТИ

3.1. Модульно-масштабована архітектура системи

Пропонована система будується за модульним принципом — конфігурація масштабується залежно від типу та розміру ОПН. Базовий модуль включає: сенсорний вузол (датчики температури, тиску, електромагнітного поля), блок обробки та передачі даних, імітаційний модуль з нагрівальними елементами, кутовими відбивачами та автономним блоком управління.

Масштабування здійснюється нарощуванням кількості модулів відповідно до геометрії об'єкта та необхідного рівня захисту. Для малого об'єкта (резервуарний парк площею до 1 га): 3–4 сенсорні вузли, 4–6 імітаційних модулів, єдиний блок управління. Для великого об'єкта (підстанція 110/35/10 кВ): 8–12 сенсорних вузлів, 12–20 імітаційних модулів, ієрархічна система управління з центральним та периферійними вузлами. Між конфігураціями немає принципової технологічної різниці — лише кількість однотипних модулів, що спрощує логістику та обслуговування. Уніфікація елементної бази скорочує терміни відновлення системи після втрати окремих модулів: кожен модуль є функціонально взаємозамінним у межах заданої конфігурації.

Модульний принцип забезпечує живучість системи: часткове ураження одного або кількох імітаційних модулів не виводить її з ладу — решта модулів перерозподіляють навантаження. Рівне розміщення (від 4 одиниць) підвищує ймовірність відводу ЗПН: «центр мас» хибної сигнатури формується у просторі між модулями, що ускладнює точне наведення навіть при знищенні частини мережі.

Маса одного імітаційного модуля — 1,5–2,5 кг, що відповідає вантажопідйомності сучасних вантажних БпЛА та уможлиблює дистанційне розгортання у важкодоступних або небезпечних зонах без ризику для особового складу⁸.

3.2. Мультимодальність: канали імітації та моніторингу

Система реалізує мультиспектральний підхід, охоплюючи основні фізичні канали, за якими сучасні ГСН ідентифікують ціль. Тепловий канал (інфрачервоний діапазон): нагрівальні елементи модуля відтворюють теплову сигнатуру КЕ відповідно до поточного режиму роботи, що передається сенсорною мережею в режимі реального часу. Радіолокаційний канал: кутові відбивачі з фрактальною геометрією корпусу формують ефективну поверхню розсіювання, характерну для реального об'єкта. Синхронізація обох каналів забезпечує мультиспектральну відповідність хибної цілі реальному КЕ.

Перспективний напрям розвитку — розширення мультимодальності завдяки акустичному каналу (для протидії ГСН, що використовують акустичну ідентифікацію промислових об'єктів) та оптичного каналу видимого спектру (для протидії оптико-електронним системам розвідки та БпЛА-спостерегачам). Обидва канали можуть бути реалізовані як додаткові модулі в рамках тієї ж архітектури без зміни базової платформи.

Акустичний канал імітації реалізується через цифрові синтезатори звукового спектру, що відтворюють характерний шумовий профіль технологічного обладнання ОПН у діапазоні 50–5000 Гц: шум насосних агрегатів (основна частота 150–300 Гц та гармоніки), гудіння силових трансформаторів (50 Гц та парні гармоніки), вібрація компресорів. Спектральна ідентичність імітованого джерела шуму реальному об'єкту забезпечується попереднім вимірюванням акустичного профілю ОПН в штатному режимі роботи. Оптичний канал передбачає застосування матриць з регульованим коефіцієнтом відбиття у діапазоні 0,4–0,75 мкм на основі електрохромних або рідкокристалічних панелей. Керований коефіцієнт відбиття (0,05–0,85) дозволяє імітувати спектральну яскравість промислових конструкцій для протидії оптичній розвідці з БпЛА та комерційних супутникових систем спостереження.

3.3. Компонент І: цифрова тінь для превентивного управління ризиками ОПН

Технологія цифрової тіні забезпечує однобічний автоматизований потік даних від фізичного об'єкта до його цифрового відображення¹⁰. На відміну від традиційних систем моніторингу, цифрова тінь формує безперервну динамічну картину стану обладнання, виявляючи відхилення від норми на ранніх стадіях — до переходу в аварійну ситуацію.

¹⁰ W Kritzinger та ін, 'Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification' (2018) 51(11) IFAC-PapersOnLine 1016 <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>>.

Як перший верифікаційний приклад розглядається склад нафти та нафтопродуктів — найбільш часто атакована категорія ОПН в Україні з 2022 р. Сенсорна мережа здійснює безперервний моніторинг тиску у резервуарах та трубопроводах (виявлення витоків на ранній стадії), температурного режиму продуктів (ризик самозаймання), корозійного стану металоконструкцій (розвиток тріщин і деформацій), герметичності з'єднань та запірної арматури. Будь-яке відхилення від нормативних значень автоматично генерує сигнал тривоги для оперативного персоналу.

Для типового резервуара вертикального сталевого (РВС) критичними є такі порогові значення: зростання температури стінки понад 3 °C/год свідчить про початок внутрішнього нагрівання; зниження тиску у замкнутій системі трубопроводів більш ніж на 0,03 МПа за 30 хвилин — індикатор витоку; концентрація парів вуглеводнів понад 10 % від нижньої межі вибуховості потребує негайного реагування¹¹. Безперервний контроль цих параметрів забезпечує перехід від реактивного гасіння пожеж до превентивного усунення причин займання — що в умовах воєнного часу, коли розгортання пожежно-рятувальних підрозділів може бути ускладнено, є критично важливим¹².

Порівняльна характеристика традиційного підходу та технології цифрової тіні для управління ризиками на ОПН наведена в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння традиційного підходу та технології цифрової тіні для управління ризиками на ОПН

Характеристика	Традиційний підхід	Цифрова тінь
Джерело даних про стан об'єкта	Планові огляди та діагностика	Безперервні дані сенсорів у реальному часі
Частота оновлення даних	Дискретна (планові перевірки)	Безперервна або з мінімальною затримкою
Виявлення прихованих дефектів	Обмежено — між перевітками дефект може розвинути	Автоматично — за трендом відхилення параметрів
Управління ризиками	Реактивне — усунення наслідків	Превентивне — попередження відмов
Ефективність в умовах воєнного часу	Знижується через порушення регламентів	Зберігається — автоматичний безперервний контроль
Додаткова функція для захисту від ЗПН	Відсутня	Так — формування сигнатурного профілю для цифрового фантому

Джерело: складено авторами на основі^{13,14}

3.4. Компонент II: цифровий фантом для активного управління сигнатурою

Цифровий фантом — модуль активної мультиспектральної імітації, що формує динамічний сигнатурний образ реального об'єкта у тепловому та радіолокаційному діапазонах і розміщується

¹¹ M Soori, B Arezoo and R Dastres, 'Digital Twin for Smart Manufacturing: A Review' (2023) 2 Sustainable Manufacturing and Service Economics 100017 <<https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017>>.

¹² О В Савченко, А А Стацюк, Н О Гарькава, 'Технології цифрових тіней та цифрових двійників для проактивного управління ризиками на об'єктах підвищеної небезпеки' [2026] Матеріали І Міжнар. наук.-практ. конф. «Технології безпеки: сучасні виклики та перспективи» (Черкаси 2026) 19.

¹³ О В Савченко, Н О Гарькава, А А Стацюк, 'Активна мультиспектральна імітація як метод інженерного захисту об'єктів енергетики від засобів повітряного нападу' [2026] Матеріали ІІ Міжнар. наук.-практ. конф. «Цивільний захист в умовах війни» (ЛДУБЖД, Львів 2026) 6.

¹⁴ W Kritzingер та ін, 'Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification' (2018) 51(11) IFAC-PapersOnLine 1016 <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>>.

на безпечній відстані від КЕ. Принципова відмінність від традиційних пасивних приманок (муляжів, кутових відбивачів) — адаптивність: параметри випромінювання автоматично коригуються в реальному часі відповідно до поточного стану реального об'єкта, що передається сенсорною мережею.

Механізм відводу ЗПН передбачає три ключові умови. Просторове ешелонування: модулі цифрового фантому розміщуються на відстані не менше 100 м від КЕ — ця відстань утворює безпечну зону, в межах якої детонація бойової частини ЗПН не спричиняє критичних пошкоджень реальної інфраструктури. Синхронна активація: при отриманні сигналу загрози модулі відтворюють теплову та радіолокаційну сигнатуру КЕ відповідно до актуального профілю, сформованого сенсорною мережею. Пріоритезація хибної цілі: алгоритми ГСН ідентифікують хибну ціль як первинну через відповідність сигнатурі КЕ і коригують траєкторію ЗПН від реального об'єкта.

Як другий верифікаційний приклад розглядається трансформаторна підстанція 110/35 кВ. Підстанція має характерну теплову сигнатуру (трансформатори масляного охолодження генерують стабільне теплове поле) та радіолокаційну сигнатуру (металевий корпус трансформаторів із специфічною геометрією). Сенсорна мережа в режимі реального часу передає параметри теплового навантаження трансформаторів залежно від поточного графіка навантаження; ці ж параметри налаштовують нагрівальні елементи модулів цифрового фантому. Хибна ціль відтворює динамічний, а не статичний образ реального КЕ, що підвищує ймовірність успішного відводу ГСН.

Ефективність відводу підкріплюється властивостями групового розміщення модулів: роєве розташування чотирьох і більше модулів формує «центр мас» хибної сигнатури, що стабільно домінує над сигнатурою реального КЕ. Для трансформаторної підстанції 110/35 кВ стандартний силовий трансформатор ТДН-16000 у режимі номінального навантаження має температуру корпусу 55–70 °С і характерний електромагнітний образ на частотах 50 Гц та гармоніках — параметри, які точно відтворюються модулем на основі даних сенсорної мережі. Навіть при знищенні 30–40 % модулів решта групи зберігає сигнатурний контраст, достатній для дезорієнтації ГСН.

3.5. Економічний аналіз та обґрунтування ефективності

Економічне обґрунтування концепції ґрунтується на двох аргументах: порівняльній вартості компонентів та принципі окупності єдиної інфраструктури. Вартість одного імітаційного модуля цифрового фантому оцінюється авторами в 5 500–10 000 грн; комплект з 4–6 модулів — 22 000–60 000 грн. Вартість традиційних металевих кутових відбивачів для аналогічного периметра вища у 2–6 разів, при цьому вони не забезпечують ні моніторингу технологічного стану, ні адаптивності до поточних параметрів об'єкта. Укриття типу «Саркофаг» коштує від 4,5 млн грн і не вирішує проблеми сигнатурної вразливості.

Сенсорна мережа, розгорнута для цифрової тіні, є одночасно інвестицією в активний компонент захисту: вартість розгортання системи моніторингу (сенсори, мережа передачі даних, програмне забезпечення) повністю включається в собівартість системи цифрового фантому через спільну інфраструктуру. Повна вартість дворівневої системи виявляється меншою за сукупність вартостей двох окремих систем.

Порівняльний економічний аналіз підходів до захисту ОПН наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняльний економічний аналіз підходів до захисту ОПН

Показник	Пасивний фізичний захист	Тільки моніторинг (ЦТ)	Тільки імітація (ЦФ)	Дворівнева система (ЦТ + ЦФ)
Захист від внутрішнього ризику	Ні	Так	Ні	Так
Захист від зовнішнього удару	Частково	Ні	Так	Так
Усунення сигнатурної вразливості	Ні	Ні	Так	Так
Адаптивність до розміру об'єкта	Обмежена	Висока	Висока	Висока
Орієнтовна вартість (малий об'єкт)	0,15–4,5 млн грн	Вартість сенсорної мережі (визначається масштабом ОПН, орієнтовно від 80 тис. грн)	22–60 тис. грн/компл.	Менше за суму двох окремих систем
Час розгортання активного захисту	1–14 діб	—	Доставка БпЛА	Доставка БпЛА

Примітка: ЦТ — цифрова тінь, ЦФ — цифровий фантом. Джерело: складено авторами.

4. ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

У запропонованій концепції здійснено системне поєднання технологій цифрового моніторингу та активного управління сигнатурою в єдиній архітектурі захисту стаціонарних цивільних ОПН. Наукова новизна полягає в обґрунтуванні принципу подвійного використання сенсорної інфраструктури: єдина мережа сенсорів забезпечує одночасно функцію превентивного моніторингу технологічних ризиків (цифрова тінь) та функцію формування актуального сигнатурного профілю для систем активного імітаційного захисту (цифровий фантом). Це дозволяє досягти синергетичного ефекту за умови істотного скорочення сукупних витрат порівняно з автономним розгортанням обох підсистем.

Концепція однаково застосовна до ОПН різних типів. Нафтосховища виграють передусім від компоненту цифрової тіні: безперервний моніторинг герметичності, корозійного стану та температурного режиму запобігає аваріям, які в умовах воєнного часу можуть спричинити пожежу або розлив із масштабними хімічними наслідками. Об'єкти енергетичної інфраструктури (підстанції, ТЕЦ) виграють насамперед від компонента цифрового фантому: їхня характерна теплова сигнатура робить їх легко впізнаваними цілями для мультиспектральних ГСН, тому зниження ймовірності прямого влучання є пріоритетним завданням.

Система має потенціал для розвитку за кількома напрямками: розширення мультимодальності завдяки акустичному та оптичному каналам імітації; інтеграція алгоритмів машинного навчання для прогнозування технічного стану обладнання на основі даних цифрової тіні; розробка уніфікованого програмного інтерфейсу для взаємодії з існуючими АСУ ТП ОПН. Окремим напрямом є нормативне закріплення: результати дослідження можуть стати основою для розробки рекомендацій ДСНС

України щодо технічного захисту ОПН в умовах збройного конфлікту — відповідно до вимог Сендайської рамкової програми зі зниження ризику лих на 2015–2030 роки.

Разом із тим, концепція має визначені межі застосування, що окреслюють пріоритети подальших досліджень. Ефективність компонента цифрового фантому обмежена щодо боєприпасів з інерційно-супутниковим наведенням (GPS/ГЛОНАСС): такі ЗПН наводяться за координатами, а не за фізичною сигнатурою об'єкта, і тому не реагують на теплову чи радіолокаційну хибну ціль. Відповідно, цифровий фантом є ефективним насамперед проти ЗПН з тепловими та активно-радіолокаційними ГСН кінцевої ділянки траєкторії. Безперервна робота системи потребує надійного автономного електроживлення — резервних акумуляторних блоків або генераторних установок — для забезпечення функціональності в умовах пошкодження централізованої енергомережі. Розміщення імітаційних модулів поза периметром ОПН на відкритій місцевості вимагає регулярного технічного обслуговування та захисту від несанкціонованого доступу. Зазначені обмеження не нівелюють концепцію в цілому, а окреслюють контекст її оптимального застосування: промислові ОПН з добре вираженою тепловою та радіолокаційною сигнатурою, що перебувають під загрозою ЗПН з активним кінцевим самонаведенням.

ВИСНОВКИ

1. В умовах збройного конфлікту ОПН зазнають подвійної загрози — технологічної деградації та прицільних ударів ЗПН, — які взаємно підсилюють одна одну через механізм каскадної відмови. Жоден із чинних нормативних підходів до захисту ОПН не охоплює обидва класи загроз одночасно, що підтверджує необхідність концептуально нових рішень.

2. Технологія цифрової тіні забезпечує безперервний превентивний моніторинг і переважає традиційні методи нагляду, оскільки не залежить від регулярності планових перевірок.

3. Технологія цифрового фантому усуває сигнатурну вразливість ОПН перед мультиспектральними ГСН і забезпечує активний відвід ЗПН без залучення особового складу.

4. Реалізація обох компонентів на єдиній сенсорній платформі економічно ефективніша за роздільне розгортання і забезпечує синергетичний інфраструктурний ефект.

5. Модульна масштабована архітектура забезпечує застосовність системи до ОПН різних типів, конфігурацій та масштабів.

ВИСНОВОК

Сучасні збройні конфлікти в Україні поставили перед системами біобезпеки, охорони здоров'я, реагування на надзвичайні ситуації та управління ризиками для довкілля нові складні завдання. У монографії представлено комплексний науковий аналіз загроз біологічного, хімічного, радіаційного та екологічного походження, що посилюються унаслідок військових дій, а також оцінку їхнього впливу на довкілля, здоров'я населення та функціонування систем цивільного захисту.

Комплексність досліджень підтверджує важливу роль біобезпеки та біозахисту у запобіганні поширенню інфекційних хвороб, впливі біотероризму та збереженні функціональної стабільності систем охорони здоров'я. Встановлено ефективність застосування комплексних методів раннього виявлення загроз, цифрових технологій, геоінформаційних систем і моделей штучного інтелекту для моніторингу та управління ризиками, що дозволяє підвищити готовність підрозділів реагування та зменшити потенційний вплив на населення і довкілля

Монографія узгоджується з ключовими положеннями рішення II Міжнародної науково-практичної конференції «Біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни» (м. Львів, 27 травня 2026 року) та визначає наступні напрями підвищення стійкості систем біобезпеки та цивільного захисту:

- створення та удосконалення національної системи моніторингу, раннього виявлення та реагування на біологічні, хімічні, радіаційні та екологічні загрози;

- підготовка фахівців нової генерації для роботи в умовах сучасних комплексних загроз;

- розвиток міжнародної науково-практичної співпраці для запобігання катастрофам, відновлення постраждалих територій та впровадження кращих практик у сфері біобезпеки, біозахисту та екологічної стабільності.

Представлені матеріали формують науково-методичну основу для розробки ефективних стратегій управління ризиками, екологічного відновлення та забезпечення комплексного біозахисту населення і довкілля, а також для науково-практичної підтримки систем реагування на сучасні безпекові виклики.

*колективна монографія
за загальною редакцією*

**ПОПОВИЧА Василя Васильовича
СЕРГІЄНКО Вікторії Олександрівни
ІВАНЧЕНКО Наталії Олександрівни**

БІОЛОГІЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ЗАГРОЗИ В УМОВАХ ВІЙНИ

BIOLOGICAL, CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL THREATS IN WARTIME CONDITIONS

Технічні редактори

**Катерина СТЕПОВА
Тетяна СКИБА
Ірина ФЕДІВ**

Комп'ютерна верстка

Маріанна КЛИМУС

Друк

Назарій ПЕТРОЛЮК

Підписано до друку 19.06.2026 р.
Формат 60x84/12. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 37,58.
Наклад 90.
Друк ЛДУ БЖД
79007, Україна, м. Львів, вул. Клепарівська, 35
Тел. /факс: (032)233-24-79
E-mail: vnrd@ldubgd.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №7249 від 09.02.2021 р