

**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 імунодефіцитні 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 контактано-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 сприйнятливої 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 кору 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 загрозовою 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 (А, В, С) 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*), меліюдозу (*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: ресстрація 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 Koblentz, 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. Глюкокортикоїди блокують транскрипцію генів прозапальних цитокінів (IL-1, IL-6, TNF-alpha), пригнічують проліферацію Т-кілерів та НК-клітин.

Цей психонейроімунний 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.