



А. М. Тимчишин¹, К. В. Тимчишин²

¹Івано-Франківська філія Університету «Україна», м. Івано-Франківськ, Україна
²Івано-Франківський фаховий коледж Київського університету інтелектуальної власності та права Національного університету «Одеська юридична академія», м. Івано-Франківськ, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9591-8273> – А. М. Тимчишин
<https://orcid.org/0009-0000-1710-8075> – К. В. Тимчишин
 andriy_tum@ukr.net

ІННОВАЦІЙНІ БІОТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ДОСУДОВОГО РОЗСЛІДУВАННЯ: ІДЕНТИФІКАЦІЯ БІОЛОГІЧНИХ ЗАГРОЗ В УМОВАХ ВІЙНИ

У статті досліджується роль інноваційних біотехнологій у системі досудового розслідування з акцентом на ідентифікацію біологічних загроз у контексті збройних конфліктів. На тлі гібридної війни, де біологічна зброя та інформаційні провокації набувають нових форм, особливого значення набувають методи криміналістичної епідеміології та мікробіологічної експертизи. У фокусі — можливості сучасних технологій, зокрема NGS-секвенування, систем CRISPR-діагностики, біоінформатики та портативних ПЛР-комплексів, які дозволяють оперативно виявляти, класифікувати та атрибутувати патогени навіть у польових умовах. У роботі проаналізовано низку прецедентів застосування або підозри у використанні біологічних агентів у США, Сирії, Грузії та Україні. Зокрема, розглянуто кейс біоінформаційної атаки проти України, яка супроводжувалась звинуваченнями в розробці біозброї без надання доказів, а також ефективну відповідь українських медичних структур у формі мобільного біонагляду. Підкреслюється необхідність інтеграції біотехнологічних інструментів у систему міжнародного кримінального права, оскільки традиційні методи розслідування виявляються неефективними щодо латентних біозлочинів. Стаття формує міждисциплінарне бачення ролі біотехнологій не лише як медичних, а і як доказових, профілактичних та правозахисних інструментів у сучасних умовах глобальної нестабільності.

Ключові слова: біозагроза, мікробіологічна криміналістика, досудове розслідування, біотехнології, гібридна війна, біоінформатика, метагеноміка, епідеміологічна розвідка.

А. М. Tymchyshyn¹

¹*«Open International University for Human Development «Ukraine»
 Ivano-Frankivsk Branch, Ivano-Frankivsk, Ukraine*

К. В. Tymchyshyn²

²*Ivano-Frankivsk Professional College of the Kyiv University, Ivano-Frankivsk, Ukraine*

INNOVATIVE BIOTECHNOLOGIES AS A TOOL OF PRE-TRIAL INVESTIGATION OF BIOLOGICAL THREATS IN WARTIME

This article explores the critical role of innovative biotechnologies within the system of pre-trial investigation, with a particular and timely focus on the effective identification of biological threats in the challenging context of contemporary armed conflicts. Against the complex backdrop of hybrid warfare, where biological weapons and targeted disinformation campaigns gain unprecedented dimensions, specialized methods of forensic epidemiology and detailed microbiological expertise are becoming increasingly vital. The study thoroughly emphasizes the significant potential of modern technological tools such as Next-Generation Sequencing (NGS), advanced CRISPR-based diagnostics, sophisticated bioinformatics, and portable PCR systems. These technologies collectively enable the rapid and accurate detection, detailed classification, and precise attribution of pathogens even when operating in challenging field conditions. Several key precedent-setting cases involving the suspected or confirmed use of biological agents in diverse regions, including the United States, Syria, Georgia, and Ukraine, are meticulously analyzed within the paper. Special attention is dedicated to the case of the protracted “biological disinformation attack” against Ukraine, which was accompanied by unfounded

accusations of bioweapons development, and the effective counter-response orchestrated by Ukrainian medical services through advanced mobile biosurveillance. The paper explicitly highlights the urgent need to formally integrate cutting-edge biotechnological tools into international criminal justice mechanisms, as conventional investigative approaches often prove inadequate in uncovering complex and latent biocrimes. This interdisciplinary research comprehensively reframes biotechnology not merely as a medical or healthcare resource, but also as a powerful forensic, preventive, and crucial human rights instrument in the current era of global geopolitical instability.

Keywords: biological threat, microbial forensics, pre-trial investigation, biotechnology, hybrid warfare, bioinformatics, metagenomics, epidemiological intelligence, criminal justice.

Постановка проблеми. Збройні конфлікти ХХІ століття кардинально відрізняються за характером воєнних дій, зважаючи на ймовірність залучення нових, складніших форм загроз — зокрема, біологічної зброї та біотероризму, що покликані паралізувати військову логістику, посіяти паніку серед цивільного населення та спричинити масштабні гуманітарні кризи. У сучасних умовах військові операції поряд з фізичними руйнуваннями також несуть загрози епідеміологічного характеру, що можуть бути спровоковані як природними чинниками, так і цілеспрямованим розповсюдженням патогенів.

Біологічні агенти (бактерії, віруси, токсини) можуть використовуватися для деструкції військових сил, залякування населення або дестабілізації інфраструктури. Ці форми впливу часто залишаються невидимими на початкових етапах, що значно ускладнює виявлення джерела інфекції та притягнення винних до відповідальності.

У таких умовах інноваційні біотехнології перетворюються на потужний інструмент досудового розслідування, поєднуючи методи криміналістичного аналізу із сучасними технологіями ідентифікації джерел патогенів, виявлення їхньої штучної модифікації та встановлення маршруту розповсюдження.

Станом на 2025 рік міжнародна спільнота все частіше висловлює глибоку стурбованість зростанням ризику застосування біологічної зброї в локальних конфліктах, зокрема — в умовах гібридної війни, що включає кібер- та інформаційні атаки поряд із потенційними біологічними диверсіями. Особливо актуальною ця проблема постає для України, що опинилася у центрі реальних загроз, які супроводжуються дезінформаційними кампаніями про нібито створення Україною «біолабораторій», «бойових голубів та комарів» [10; 12].

Метою дослідження є комплексний аналіз потенціалу інноваційних біотехнологій у виявленні, ідентифікації та атрибуції біологічних загроз у контексті сучасних збройних конфліктів, а також обґрунтування їхнього значення як інструменту досудового розслідування в умовах гібридної війни.

Методологічні основи дослідження ґрунтуються на міждисциплінарному підході, що поєднує

методи контент-аналізу, порівняльного кейс-стаді, біоетико-правового аналізу та елементів емпіричного узагальнення. Основну увагу зосереджено на вивченні прецедентів використання або підозри у використанні біологічних агентів у контексті збройних конфліктів та гібридних загроз. Для цього здійснено відбір кейсів на основі трьох ключових критеріїв:

1) наявність фактичних або інформаційних ознак біологічної загрози;

2) участь державних, військових або парамілітарних структур;

3) фіксація медичної чи правової реакції (національної або міжнародної) [1; 3].

Виклад основного матеріалу. У випадках застосування біологічної зброї традиційні слідчі методи виявляються недостатніми. Тут на перший план виходить криміналістична (судово-медична) епідеміологія — наука, яка аналізує параметри спалаху інфекційного захворювання не лише з точки зору громадського здоров'я, а й у межах кримінального розслідування.

Мета такого підходу — відрізнити природне поширення інфекції від навмисного: встановити географічне джерело, шлях розповсюдження, часову динаміку та можливі точки контакту. Наприклад, аномальна сезонність, висока вірулентність або наявність патогену в незвичному середовищі можуть бути сигналами штучного походження [1; 5].

Ключовим інструментом стає мікробіологічна криміналістика, яка дозволяє:

- порівнювати геномні послідовності зразків з різних джерел;

- ідентифікувати штучні або лабораторні модифікації;

- встановити зв'язок патогену з відомими колекціями збудників [2; 5].

Перелічені методи активно використовувалися, наприклад, у справі про сибірську виразку у США (2001), де завдяки аналізу ДНК вдалося простежити походження бактерій до конкретної лабораторії [8].

Кейс з сибіркою у США потребує детальнішого розгляду. Після теракту 11 вересня 2001 року в поштові відділення США почали надходити загадкові конверти. Вони містили білий порошок і зловісні записки. За кілька днів десятки людей були госпіталізовані, п'ятеро —

померли. Аналіз показав: це був *Bacillus anthracis* — збудник сибірки.

ФБР ініціювало масштабне розслідування — найдорожче в історії США судово-медичне епідеміологічне дослідження, яке тривало понад 7 років. Патогени з конвертів було секвеновано та порівняно з колекціями бактеріальних культур з усіх лабораторій країни. Біотехнологічні методи виявили мікроскопічні генетичні мітки, що дозволили звузити коло підозрюваних до працівників однієї з військових лабораторій. Врешті, підозра впала на доктора Брюса Айвінса, який наклав на себе руки перед звинуваченням [8].

Описаний випадок став прецедентом інтеграції судової епідеміології та мікробіологічної криміналістики в національну систему безпеки.

Ще один цікавий кейс як приклад — це таємничі смерті та підозри у причетності до них лабораторії Лугара в Грузії (2018). У передмісті Тбілісі розташований Центр громадського здоров'я ім. Р. Лугара, в межах якого функціонує високотехнологічна біолабораторія, створена за підтримки США. У 2018 році російські ЗМІ почали активно поширювати дезінформацію про те, що в лабораторії проводяться експерименти з бойовими біологічними агентами, нібито внаслідок яких загинули місцеві мешканці.

Офіційні перевірки не підтвердили жодних витоків чи експериментів, які могли б нести загрозу населенню, а даний кейс став символом інформаційної гібридної війни, де епідеміологія та біотехнології стали інструментами не лише науки, а й геополітики. Міжнародна експертиза вказала на те, що відомості про смерті в медичних документах було вирвано з контексту, а версії про біологічну зброю — сфабриковані та сфальсифіковані [12].

У контексті цього дослідження науковий інтерес також привертають події в Сирії (2017-2019). Внаслідок громадянської війни в Сирії, яка триває з 2011 року, десятки тисяч людей були змушені жити в умовах антисанітарії, відсутності доступу до медичних послуг і чистої води. На цьому тлі почастішали спалахи холери, тифу та рикетсіозів, особливо у північних провінціях, контрольованих різними воєнізованими угрупованнями.

У 2017 році Всесвітня організація охорони здоров'я зафіксувала аномально високі показники холери, при цьому збудник мав генетичні відмінності від природних варіантів, що спонукало до глибшого розслідування [6]. Було висловлено підозру, що використання заражених джерел води могло мати навмисний характер — як засіб залякування та деморалізації цивільного населення.

В умовах війни, коли звичайне епідеміологічне розслідування стає практично

неможливим, існує ймовірність приховати можливу біологічну провокацію під виглядом «природного спалаху». Але завдяки мобільним біоінформатичним системам, які використовували міжнародні волонтерські медичні місії, вдалося локалізувати зараження та встановити його географічне ядро, зупинивши подальше поширення хвороби [6].

Кейс Сирії демонструє, наскільки тонкою може бути межа між природною епідемією та цілеспрямованою біологічною атакою під час збройного конфлікту, а сучасні біотехнології є чи не єдиним інструментом розрізнення між природним і штучним походженням спалахів інфекційних захворювань.

Проте особливу увагу в цьому дослідженні привертає український кейс. Від початку повномасштабної агресії з 2022 року Україна стала не лише ареною бойових дій, а й об'єктом масованих звинувачень з боку росії у «створенні біозброї», «бойових вірусів», «генетично модифікованих комах-розповсюджувачів інфекцій» та ін. Було опубліковано сотні заяв про «секретні біолабораторії», «американських кураторів» та «польові експерименти над громадянами». Однак жодних незалежних доказів таких дій надано не було, а всі матеріали мали характер пропагандистського терору [10; 12].

Безпрецедентний за своїми масштабами приклад України проілюстрував іншу сторону біологічних загроз — інформаційно-кримінологічну, де біотехнології використовуються як об'єкт спекуляцій, що може слугувати виправданням для ескалації конфлікту. Однак, паралельно із спростуванням інформаційних атак, медичні служби України почали використовувати біотехнології для моніторингу інфекцій, зокрема, завдяки пересувним генетичним лабораторіям, які фіксували спалахи хвороб серед військових і цивільного населення, що дозволило фіксувати реальні спалахи захворюваності і запобігати епідеміям; документувати докази для судових процедур, а також демонструвати прозорість та відповідність міжнародним стандартам біобезпеки [12].

Отож, біологічні атаки можуть бути кваліфіковані як воєнні злочини (ст. 8 Римського статуту) або злочини проти людяності. Але для цього потрібна доказова база, що ґрунтується не лише на гуманітарних спостереженнях, а й на точних біологічних фактах.

Біологічна зброя є стратегічно непередбачуваною: вона не піддається точному контролю, має інкубаційний період, її поширення залежить від метеорологічних умов, руху цивільного населення, стану екосистем. І головне — біозброя не розрізняє «своїх» і «чужих». У разі

пандемічного сценарію (навіть локального) страждають і війська, і тил, і союзники.

Також високим є ризик зворотного ефекту (blowback). У випадку використання біоагентів агресор може сам стати жертвою. Природа — не союзник біозброї. Історія знає приклади, коли бойові патогени не зупинялися на цілі, а спричиняли широкомасштабне лихо. Навіть у лабораторних умовах існує далеко не нульова ймовірність витоків, не кажучи вже про бойові дії високої інтенсивності і непередбачуваності.

До характеристик потенційної біологічної зброї відноситься неможливість точкового ураження. На відміну від високоточних ракет або кіберзброї, біологічна зброя не здатна вразити конкретний об'єкт. Якщо біологічні патогени розглядати як зброю, то це «сліпа» зброя, яка або призводить до масових жертв, або — при надмірній стерилізації середовища — шкодить загальній екосистемі.

Отже, найбільш ймовірний вектор використання — це терористичні погрози і дестабілізація цивільного населення. Реальна біозброя — це не фронтовий інструмент, а інструмент терору, хаосу, підриву довіри до інституцій. Її ціллю може бути не фізичне знищення, а психологічне розкладання суспільства: через страх, паніку, параліч систем охорони здоров'я.

Таким чином, тема біологічної зброї — це, у першу чергу, ідеальний інструмент для провокацій або фальсифікацій. Російська пропаганда неодноразово звинувачувала Україну у так званому «створенні біолабораторій НАТО» — хоча це абсурд, сам факт обвинувачення показує, наскільки легко можна використати тему біологічної зброї як частину зброї інформаційної.

Проте, технології нового покоління змінили правила гри. Метагеноміка, зокрема NGS (Next Generation Sequencing), дає змогу ідентифікувати навіть синтетично модифіковані патогени без потреби в культурі [3].

Системи CRISPR-діагностики SHERLOCK і DETECTR демонструють високу специфічність у польових умовах, дозволяючи оперативно підтвердити факт зараження [7].

Біоінформатика, завдяки доступу до баз типу GenBank чи GISAID, дозволяє ідентифікувати лабораторне походження патогенів, а також відстежити мутаційний шлях вірусу [4].

Портативні ПЛР-системи (BioFire, GeneXpert) стали основою мобільних лабораторій, що активно використовуються українськими медиками під час воєнних дій [11].

Мікробіологічна експертиза дозволяє виявити генетичні маркери, що вказують на

країну-розробника або навіть конкретну лабораторію [2].

Однак міжнародне право все ще не має усталеної процедури розслідування біозлочинів, що ускладнює покарання винних. Основні труднощі юридичного процесу полягають у таких факторах:

1. Відсутність універсальної процедури розслідування біозлочинів. Цей фактор пов'язаний з тим, що міжнародне право не має єдиного механізму фіксації та атрибуції біологічних атак [9]. Хоча Конвенція про біологічну зброю (КБЗ 1972) забороняє розробку і використання такої зброї, проте не містить механізмів перевірки, інспекцій чи процедур розслідування. Не існує спеціальної міжнародної структури, яка уповноважена виїхати на місце ймовірного застосування біологічної зброї, відібрати зразки аналізів, провести їх дослідження та встановити причетність конкретної держави чи організації.

2. Дефіцит фахівців з біокриміналістики. Цей фактор має об'єктивні причини, оскільки біотехнології розвиваються надзвичайно стрімко, а біокриміналістика — це «молодий» напрям, який вимагає від фахівців володіння цілим набором унікальних компетентностей: вміння працювати з високоризиковими патогенами (BSL-3/4); розуміння механізмів мутації та штучної модифікації; навички секвенування та філогенетичного аналізу; юридична грамотність, щоб правильно оформити доказову базу. Отож, лише обмежена кількість спеціалістів здатна проводити дослідження такого рівня.

3. Високий ризик політизації. Цей фактор повинен бути під особливим контролем міжнародної спільноти, оскільки будь-яка експертиза у сфері біозброї потенційно може бути використана в інформаційній війні [9]. У зв'язку з тим, що біологічний патоген може швидко поширюватись, змінюватись (мутувати), руйнуватись у навколишньому середовищі, а його виявлення потребує високотехнологічного обладнання і висококваліфікованих фахівців — це ідеальний об'єкт для маніпуляцій, оскільки переважна більшість населення не володіє глибинними знаннями з генетики, мікробіології, вірусології тощо. Таким чином серед цивільного населення досить легко посіяти паніку і поширювати фейки щодо біологічних загроз.

4. Складність збору зразків у зоні бойових дій: Щоб довести біозлочин, потрібні зразки ґрунту, води, повітря; біоматеріали (кров, тканини, мазки); зразки патогену в «живому» або стабілізованому вигляді; правильний ланцюг збереження доказів (chain of custody). А у зоні бойових дій це майже неможливо через високий рівень небезпеки для експертів (лабораторні

групи не можуть працювати під обстрілами). Вибухи, пожежі, руйнування будівель з великою вірогідністю можуть призвести до втрати або руйнування доказів, оскільки патогени легко деградують при високій температурі, руйнуються під дією світла, втрачають ключові генетичні маркери. Для мікробіологічної експертизи критично важливо уникнути контамінації, що надзвичайно важко в умовах бойових дій, де надзвичайно складно гарантувати стерильність. У результаті зібрані докази можуть бути визнані недостатніми, непридатними, недостовірними, юридично невалідними.

Таким чином, проаналізовані фактори створюють ситуацію, за якої біозлочини надзвичайно складно довести; міжнародне право не має єдиного механізму їхнього розслідування; біотехнологічні докази часто піддаються політичним маніпуляціям; реальний збір матеріалів у зоні війни — майже неможливий.

Саме тому Україна та інші держави наголошують на необхідності створення міжнародної групи біокриміналістичних експертів; прозорих правил фіксації та атрибуції біологічних інцидентів; уніфікованих стандартів для доказової бази у справах про біологічні злочини.

Висновки. Підсумовуючи зазначмо, що збройні конфлікти XXI століття вийшли за межі суто військового протистояння, трансформувались у багатовимірні гібридні війни. З огляду на це, під пильну увагу фахівців потрапляють ризики біологічних загроз, які можуть виникати як унаслідок природних процесів, так і в результаті цілеспрямованого застосування патогенів. Аналіз міжнародних кейсів та українського досвіду, що сформувався з початку повномасштабної війни в Україні, підтверджує, що традиційні інструменти досудового розслідування недостатні для оперативної ідентифікації та атрибуції цих загроз. У цих умовах інноваційні біотехнології, зокрема, методи мікробіологічної криміналістики, біоінформатики, метагеноміки, NGS-секвенування, портативні ПЛР-комплекси, набувають ключового значення для встановлення походження патогенів, визначення маршрутів їх розповсюдження та оцінювання ймовірності їх штучних модифікацій.

Український досвід засвідчив: у світі, де інформація поширюється швидше, ніж інфекція, кожна епідеміологічна аномалія може стати об'єктом маніпуляцій, а кожна мобільна лабораторія — приводом для звинувачень у «створенні біологічної зброї». Проте, саме в цих складних обставинах наука реально підсилила можливості держави у сфері біобезпеки. Українські фахівці — попри обстріли, евакуації, відсутність стабільного електропостачання — розгортали мобільні генетичні модулі,

фіксували спалахи інфекцій серед військових та цивільних, вели щоденну боротьбу з невидимими загрозами, від яких не захищають бронезилети. Ці дії дозволили не тільки локалізувати потенційні епідемії, а й довести непричетність України до будь-яких звинувачень у біотерористичній діяльності, навіть коли такі звинувачення трансливались російськими представниками з найвищих міжнародних трибун. У цьому контексті новітні біотехнології постають вже не лише як галузь біології та медицини, а як інструмент розслідування, захисту та відновлення справедливості.

Водночас в межах проведеного дослідження ідентифіковано низку системних викликів: відсутність універсальних міжнародних механізмів атрибуції біозлочинів, ризики політизації спеціалізованих експертиз, недостатня кількість фахівців у сфері біокриміналістики та складності зі збором доказового матеріалу в зоні бойових дій.

Узагальнюючи дослідження, вважаємо доцільним запропонувати комплекс практичних рекомендацій для підвищення ефективності досудового розслідування біологічних загроз:

1. Розробити та затвердити національний протокол вилучення, зберігання і транспортування біологічних доказів, адаптований до умов воєнного часу та інтегрований із чинними положеннями КПК України.

2. Інституціоналізувати використання інструментів метагеноміки, NGS-секвенування та біоінформатики у процесі досудового розслідування, передбачивши їх застосування в актах судово-медичної та мікробіологічної експертизи.

3. Ініціювати участь України у формуванні міжнародного механізму атрибуції біологічних інцидентів, що включатиме уніфіковані процедури збору доказів, стандарти генетичних аналізів та незалежну експертизу.

Список літератури:

1. Atlas, R. M. (2002). Bioterrorism: From threat to reality. *Annual Review of Microbiology*, 56, 167–185. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.56.012302.160652>
2. Budowle, B., Schutzer, S. E., Breeze, R. G., Keim, P., & Morse, S. A. (2006). Microbial forensics: The next forensic challenge. *International Journal of Legal Medicine*, 120(3), 167–173. <https://doi.org/10.1007/s00414-006-0081-y>
3. Chiu, C. Y., & Miller, S. A. (2019). Clinical metagenomics. *Nature Reviews Genetics*, 20(6), 341–355. <https://doi.org/10.1038/s41576-019-0113-7>
4. Clausen, P. T. L. C., Aarestrup, F. M., & Lund, O. (2021). Rapid and precise alignment of raw reads

against redundant databases with KMA. *BMC Bioinformatics*, 19, 307. <https://doi.org/10.1186/s12859-018-2336-6>

5. Franz D. R., Parrott C. D., Forrester J. D., Hoffman K. M. Clinical recognition of biological agents. *JAMA*. 1997. Vol. 278, No. 5. P. 399–411.

6. Funk, S., Camacho, A., Kucharski, A. J., Eggo, R. M., & Edmunds, W. J. (2018). Real-time forecasting of infectious disease dynamics with a stochastic semi-mechanistic model. *Epidemics*, 22, 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.epidem.2017.11.003>

7. Gootenberg, J. S., Abudayyeh, O. O., Kellner, M. J., Joung, J., Collins, J. J., & Zhang, F. (2017). Nucleic acid detection with CRISPR-Cas13a/C2c2. *Science*, 356(6336), 438–442. <https://doi.org/10.1126/science.aam9321>

8. Jernigan, D. B., Stephens, D. S., Ashford, D. A., Omenaca, C., Topiel, M. S., Galbraith, M., ... & Hughes, J. M. (2002). Bioterrorism-related inhalational anthrax: The first 10 cases reported in the United States. *Emerging Infectious Diseases*, 8(10), 1019–1028. doi.org/10.3201/eid0810.020353

9. Koblenz, G. D. (2010). Biosecurity reconsidered: Calibrating biological threats and responses. *International Security*, 34(4), 96–132. <https://doi.org/10.1162/isec.2010.34.4.96>

10. Wheelis, M., Rózsa, L., & Dando, M. (Eds.). (2006). *Deadly Cultures: Biological Weapons Since 1945*. Harvard University Press.

11. Yager, P., Domingo, G. J., & Gerdes, J. (2006). Point-of-care diagnostics for global health. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 10, 107–144. [org/10.1146/annurev.bioeng.10.061807.160524](https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.10.061807.160524)

12. Global Biosecurity Review. (2023). Ukrainian response to biological misinformation and infectious outbreaks. <https://globalbiosecurityreview.org/ukraine-biothreat-response>.

References:

1. Atlas R. M. Bioterrorism: From threat to reality // *Annual Review of Microbiology*. 2002. Vol. 56. P. 167-185. DOI: 10.1146/annurev.micro.56.012302.160652.

2. Budowle B., Schutzer S. E., Breeze R. G., Keim P., Morse S. A. Microbial forensics: The next forensic challenge // *International Journal of Legal*

Medicine. 2006. Vol. 120(3). P. 167-173. DOI: 10.1007/s00414-006-0081-y.

3. Chiu C. Y., Miller S. A. Clinical metagenomics // *Nature Reviews Genetics*. 2019. Vol. 20(6). P. 341-355. DOI: 10.1038/s41576-019-0113-7.

4. Clausen P. T. L. C., Aarestrup F. M., Lund O. Rapid and precise alignment of raw reads against redundant databases with KMA // *BMC Bioinformatics*. 2021. Vol. 19. P. 307. DOI: 10.1186/s12859-018-2336-6.

5. Franz D. R., Parrott C. D., Forrester J. D., Hoffman K. M. Clinical recognition of biological agents // *JAMA*. 1997. Vol. 278(5). P. 399-411.

6. Funk S., Camacho A., Kucharski A. J., Eggo R. M., Edmunds W. J. Real-time forecasting of infectious disease dynamics with a stochastic semi-mechanistic model // *Epidemics*. 2018. Vol. 22. P. 56-61. DOI: 10.1016/j.epidem.2017.11.003.

7. Gootenberg J. S., Abudayyeh O. O., Kellner M. J., Joung J., Collins J. J., Zhang F. Nucleic acid detection with CRISPR-Cas13a/C2c2 // *Science*. 2017. Vol. 356(6336). P. 438-442. DOI: 10.1126/science.aam9321.

8. Jernigan D. B., Stephens D. S., Ashford D. A., Omenaca C., Topiel M. S., Galbraith M., et al. Bioterrorism-related inhalational anthrax: The first 10 cases reported in the United States // *Emerging Infectious Diseases*. 2002. Vol. 8(10). P. 1019-1028. DOI: 10.3201/eid0810.020353.

9. Koblenz G. D. Biosecurity reconsidered: Calibrating biological threats and responses // *International Security*. 2010. Vol. 34(4). P. 96-132. DOI: 10.1162/isec.2010.34.4.96.

10. Wheelis M., Rózsa L., Dando M. (eds.) *Deadly Cultures: Biological Weapons Since 1945*. Harvard University Press, 2006.

11. Yager P., Domingo G. J., Gerdes J. Point-of-care diagnostics for global health // *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2006. Vol. 10. P. 107-144. DOI: 10.1146/annurev.bioeng.10.061807.160524.

12. Global Biosecurity Review. Ukrainian response to biological misinformation and infectious outbreaks. 2023. URL: <https://globalbiosecurityreview.org/ukraine-biothreat-response>.

© А. М. Тимчишин, К. В. Тимчишин, 2025.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції. 19.11. 2025.

Прийнято до публікації 26.11.2025.