

Еволюція хімічних, біологічних, радіологічних та ядерних небезпек. Нові виклики та загрози національній безпеці

Evolution of chemical, biological, radiological and nuclear hazards. New challenges and threats national security

Олексій Соломицький^A

д. військ. н., старший науковий співробітник, начальник відділу – заступник начальника управління, e-mail: solosa1@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8061-8895

Андрій Бачинський^A

Corresponding author: ад'юнкт, e-mail: bachinsky1985@ukr.net, ORCID: 0009-0001-3251-0326

Oleksii Solomytskyi^A

Dr of military Sciences, senior researcher, chief of section-deputy chief of derectorate, e-mail: solosa1@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8061-8895

Andrii Bachynskiy^A

Corresponding author: PhD student, e-mail: bachinsky1985@ukr.net, ORCID: 0009-0001-3251-0326

^A Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України м. Київ, Україна

^A Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: April 3, 2025 | Revised: April 22, 2025 | Accepted: April 30, 2025

DOI: 10.33445/sds.2025.15.2.10

Мета роботи: дослідження еволюції ХБРЯ небезпек та визначення впливу розвитку науково-технічної сфери на характер ХБРЯ загроз в майбутньому.

Метод дослідження: методи аналізу та синтезу, метод формалізації, кон'юнктурний аналіз.

Результати дослідження: проведено ретроспективний аналіз еволюції ХБРЯ небезпек за різними періодами, визначено основні особливості їх еволюції за кожним періодом, сформовано сучасні тенденції їх трансформації в подальшому та можливі сценарії їх реалізації.

Теоретична цінність дослідження: стаття поглиблює наше розуміння значних трансформацій в сфері ХБРЯ захисту, зумовлених технологічним прогресом, змінами в геополітичній динаміці та еволюцією на тлі широкого використання штучного інтелекту, робототехніки, аналізу великих даних, цифрової біології та біотехнологій, нано- і квантових технологій, технологій 3D-друку, кібертехнологій, а також фізики високих енергій.

Цінність: дослідження пропонує значну цінність у розумінні та прогнозуванні природи та характеру майбутніх ХБРЯ небезпек та можливих сценаріїв їх реалізації, а також надає різні позиції, через які можна аналізувати дані небезпеки та розробляти стратегії відповідно до нових загроз національній безпеці.

Майбутні дослідження: напрямками подальших досліджень можуть бути визначення та обґрунтування шляхів для ефективного реагування на майбутні ХБРЯ загрози, що враховують науково-технологічні зміни та можуть конкретно вплинути на майбутнє безпекове середовище, а також розробка концепцій, військових стратегій, оперативних планів, де визначатимуться реалізації цих шляхів.

Тип статті: теоретичний, описовий.

Purpose: to investigate the evolution of CBRN hazards and to assess the impact of scientific and technological advancement on the nature of future CBRN threats.

Method: methods of analysis and synthesis, formalization, and conjunctural analysis.

Findings: a retrospective analysis of the evolution of CBRN hazards across different periods was conducted. Key characteristics of each evolutionary stage were identified. The study outlines current trends in the transformation of such threats and possible future scenarios for their realization.

Theoretical implications: this article deepens our understanding of significant transformations in the field of CBRN defense, driven by technological progress, shifts in geopolitical dynamics, and evolution in the context of the widespread application of artificial intelligence, robotics, big data analytics, digital biology and biotechnology, nanotechnology, quantum technologies, 3D printing, cyber technologies, and high-energy physics.

Value: the research provides significant value in understanding and forecasting the nature and character of future CBRN hazards and their potential scenarios. It also offers analytical frameworks through which these hazards can be assessed and strategies can be developed in response to emerging national security threats.

Future research: further research may focus on identifying and justifying effective response strategies to future CBRN threats, considering scientific and technological changes that may influence the future security environment. It may also include the development of concepts, military strategies, and operational plans outlining the implementation of such responses.

Paper type: theoretical, descriptive.

Ключові слова: хімічний, біологічний, радіологічний і ядерний захист; БПЛА, штучний інтелект, роботизована техніка, хімічні, біологічні, радіологічні і ядерні загрози; ризики, хімічна зброя, ядерна зброя, біологічна зброя, науково-технічна сфера, технології, еволюція, інновації.

Key words: chemical, biological, radiological, and nuclear defense; UAVs, artificial intelligence, robotics, CBRN threats, risks; chemical weapons; nuclear weapons; biological weapons; scientific and technological domain; technology; evolution; innovation.

Вступ

Сучасні сценарії загроз виявляють нові типи постійно зростаючих динамічних і агресивних викликів, що зумовлює необхідність переходу від традиційного управління безпекою до стратегічного бачення захисту громадян у більш комплексний спосіб. За останні роки суттєво зросли масштаб і складність як традиційних, так і нетрадиційних загроз миру й безпеці, зокрема асиметричних конфліктів високої інтенсивності, глобального тероризму, піратства, транснаціональної організованої злочинності, технологій ведення мережевих та безконтактних дій, розширення протиборства у кіберпросторі, а також загроз безпеці ресурсів і критичної інфраструктури. Окрему небезпеку становить зростання ризиків виробництва та розповсюдження зброї масового знищення (ЗМЗ) [1].

В такому середовищі ризик інцидентів із застосуванням хімічних, біологічних, радіологічних і ядерних (ХБРЯ) агентів, які можуть призвести до масових втрат серед населення, є вкрай високим.

Протягом останнього десятиліття глобальне середовище ХБРЯ-безпеки зазнало кардинальних змін. Сьогодні ми живемо у світі, де можливість використання ХБРЯ матеріалів або ЗМЗ державними та недержавними суб'єктами залишається однією з ключових загроз міжнародній безпеці. Зменшення ефективності міжнародних норм і механізмів нерозповсюдження, посилене науково-технічними інноваціями та іншими трендами, сприяє підвищенню ХБРЯ-ризиків. Деякі міжнародні угоди втратили чинність, а відповідні норми стали розмитими і послабленими. Резолюції Ради Безпеки ООН щодо порушників договорів не завжди виконуються, що в умовах загострення суперництва між великими державами ускладнює прийняття ефективних контрзаходів.

Корейська Народно-Демократична Республіка (КНДР) продовжує розширення ядерного і ракетного потенціалу, порушуючи відповідні резолюції Ради Безпеки ООН. Іран здійснює розбудову ракетних можливостей і подальший розвиток ядерної програми, що становить тривалий виклик регіональній безпеці та безпеці НАТО. Поведінка Китайської Народної Республіки (КНР) створює системні загрози міжнародному порядку, заснованому на нормах і правилах, важливих для глобальної безпеки. КНР стрімко розширює свій ядерний арсенал, збільшуючи кількість боєголовок та сучасних систем доставки, що на фоні відсутності прозорості та обмеженої участі у міжнародних режимах контролю над озброєннями викликає особливе занепокоєння [2; 3].

Тривожні зміни у російській ядерній доктрині, оголошені в листопаді 2024 року, свідчать про наміри розширити умови застосування ядерної зброї.

Глобальні норми, закріплені Конвенцією про заборону хімічної зброї, були суттєво порушені після 2013 року, коли в Сирії неодноразово застосовувалася хімічна зброя як державними (хлор, зарин), так і недержавними суб'єктами (іприт). КНДР у 2017 році застосувала бойову отруйну речовину VX у Малайзії.

Росія систематично застосовує хімічні агенти у ході збройної агресії проти України. З лютого 2022 по січень 2025 року російські війська здійснили 6376 випадків застосування хімічних боеприпасів, зокрема: гранати К-51 із CS (2-хлорбензальмалонітрилом) – 1488 разів, гранати РГ-ВО з CN (хлорацетофеноном) – 821 раз, та інші небезпечні хімічні речовини – 4067 разів.

Росія продовжує зберігати неоголошену програму розробки хімічної зброї. Її наукові установи — 33-й науково-дослідний і випробувальний інститут, 27-й науковий центр, Державний науково-дослідний інститут органічної хімії і технології — активно займаються розробкою бойових отруйних речовин і технологій їх доставки [4; 5].

Згідно з щорічним звітом США про дотримання Конвенції про заборону хімічної зброї, станом на 2024 рік Конвенцію порушують: Бірма — через незадекларовану програму та

невиконане знищення виробничих потужностей; КНР — через потенційну розробку речовин, що діють на центральну нервову систему; Іран — через виробництво, випробування та неповне декларування об'єктів виробництва хімічної зброї; Сирія — через незадеклароване виробництво хімічної зброї та перешкоджання перевіркам [4; 6].

Недержавні суб'єкти також дедалі активніше нехтують міжнародними нормами у сфері ХБРЯ-безпеки. У період 1990–2020 років зафіксовано 565 інцидентів застосування ХБРЯ агентів недержавними суб'єктами, серед яких: повстанці, терористичні організації, наркокартелі, транснаціональні банди, приватні військові компанії. Із них 434 інциденти стосувалися хімічних агентів, 123 – біологічних, 57 – радіологічних, 18 – ядерних (деякі події включали кілька видів агентів одночасно). Загальні втрати склали 980 загиблих і 7649 поранених, при цьому найбільші втрати спричинені застосуванням хімічних агентів. П'ятірка країн, у яких було зафіксовано найбільше інцидентів: США (118), РФ (49), Ірак (43), Японія (40), Велика Британія (30) [7].

З огляду на стрімкий розвиток науки і технологій, не можна очікувати, що потенційний супротивник використовуватиме лише відомі ХБРЯ агенти або традиційні засоби їх доставки. Це обумовлює можливість загострення картини загроз у майбутньому, коли ХБРЯ агенти та засоби їх застосування можуть стати інструментом проти військових і цивільних цілей у широкому спектрі сценаріїв — від мирного часу до конфлікту чи війни.

Теоретичні основи дослідження

Сьогодні стрімкий технологічний прогрес визначає темп розвитку суспільства та життя кожної людини. Він відбувається у геометричній прогресії, що суттєво впливає на всі сфери життєдіяльності. Наука, технології та інновації відіграють ключову роль у глобальному розвитку й сприяють вирішенню світових проблем, зокрема в галузі забезпечення національної безпеки та захисту держав від можливих викликів і загроз. Не є винятком і сфера хімічної, біологічної, радіологічної та ядерної (ХБРЯ) безпеки, де новітні технології відкривають можливості для безпечнішого поводження з небезпечними матеріалами й об'єктами, а також для запобігання, виявлення й реагування на злочини, пов'язані з ХБРЯ загрозами.

Водночас сучасні технічні рішення, покликані забезпечувати безпеку, можуть також генерувати нові ризики. Передові технології, за умови їхнього зловмисного використання, здатні створювати нові виклики для безпеки. З розвитком науково-технічного прогресу середовище ХБРЯ безпеки еволюціонує, що призводить до зростання рівня небезпеки для суспільства. Нині глобальні наукові досягнення та технологічні мегатренди, зокрема діджиталізація, мініатюризація, автономізація та автоматизація, сприяють значному ускладненню спектра ХБРЯ загроз. Відповідно, зростає різноманітність потенційних загроз, що вимагає перегляду підходів до систем виявлення, фізичного захисту та медичних контрзаходів [8].

Актуальним завданням стає аналіз і осмислення глобального впливу технологічних змін, а також визначення їхніх можливостей і викликів у ХБРЯ сфері. До технологій, які нині мають суттєве значення, належать штучний інтелект (ШІ) і робототехніка, нано- і квантові технології, технології тривимірного друку (3D-друку), кібертехнології, синтетична біологія та біотехнології, а також фізика високих енергій [9; 10].

Комп'ютерні системи, робототехнічні комплекси та інші пристрої на основі ШІ здатні миттєво обробляти великі обсяги інформації та формувати рішення, що лягають в основу управлінських процесів. Основною характеристикою ШІ-пристроїв є здатність до постійного навчання, накопичення знань, їхньої обробки й ефективного застосування. Уже сьогодні ШІ стимулює появу інновацій, а його застосування у сфері ХБРЯ захисту може змінити основні підходи до створення і використання засобів ураження.

Розвиток озброєння та військової техніки, зокрема роботизованих систем, демонструє тенденцію до масового впровадження, що розширює спектр завдань, які можуть виконуватися автоматизованими засобами. Високу ефективність у різноманітних завданнях вже довели

безпілотні системи. Однак ці ж системи можуть бути використані зловмисниками для доставки й застосування засобів масового знищення (ЗМЗ) або для ураження критичних об'єктів.

Нанотехнології, що пов'язані зі створенням нових матеріалів, пристроїв і систем шляхом маніпуляцій на молекулярному й атомному рівнях, відкривають нові можливості для ХБРЯ захисту. Зокрема, вони можуть сприяти розробці високоефективних засобів ураження й захисту, що вимагає посиленої уваги до питань контролю і регулювання.

Тенденція розширення протипротива у кіберпросторі є характерною ознакою війн останнього покоління. Розвиток кібертехнологій призвів до появи кіберзброї, яка за рівнем впливу може бути співставною із традиційними засобами масового ураження. За допомогою кібератак можна дистанційно впливати на технологічні процеси критичної інфраструктури та системи управління небезпечними ХБРЯ матеріалами, що створює ризик виникнення катастрофічних наслідків.

Ми живемо в епоху безпрецедентних біологічних ризиків, спричинених стрімким розвитком синтетичної біології. Застосування технологій редагування геному, таких як CRISPR і RT-PCR, набуло широкого поширення навіть у цивільних лабораторіях, що підвищує ризик їх зловмисного використання для створення нових біологічних засобів ураження.

Активне зростання інвестицій у квантові технології, що пропонують практично необмежену обчислювальну потужність, стало глобальним явищем. Використання принципів квантової механіки (суперпозиція, квантова запутаність, тунелювання) відкриває нові можливості для обчислень, шифрування та комунікацій. Наприклад, тоді як сучасному суперкомп'ютеру для розкладання числа з 30–40 символів на прості множники знадобився б мільярд років, квантовий комп'ютер виконає цю задачу за 18 секунд. Водночас такі можливості породжують серйозні ризики для міжнародної безпеки.

Аналіз новітніх і передових технологій дозволяє краще усвідомити тенденції розвитку ХБРЯ загроз, оцінити можливі сценарії їх реалізації та визначити шляхи протидії. Це сприятиме формуванню більш глибокого розуміння проблематики нових викликів у сфері ХБРЯ безпеки, а також оцінці впливу науково-технічного прогресу на їхню еволюцію.

Постановка проблеми

Сучасні технологічні тенденції засвідчують, що більше не можна покладатися виключно на наявні переліки відомих агентів ХБРЯ-загроз або традиційні засоби їх доставки. Новітні технології значно розширюють можливості виготовлення та застосування ХБРЯ зброї як державними, так і недержавними суб'єктами, спрощуючи доступ до небезпечних агентів. Це, у свою чергу, підвищує ймовірність здійснення ХБРЯ атак у майбутньому.

Крім того, розвиток технологій спричиняє зростання ризику навмисного або ненавмисного порушення функціонування об'єктів атомної енергетики та хімічної промисловості, що може призвести до масштабних людських жертв і завдати суттєвих економічних збитків.

Новітні ХБРЯ загрози становлять серйозний виклик для існуючих систем безпеки та захисту. Забезпечення ХБРЯ безпеки традиційно є складним завданням, а стрімкий розвиток технологій призводить до ускладнення ландшафту ризиків, роблячи його ще більш динамічним і небезпечним. Усвідомлення й аналіз нових ризиків має вирішальне значення для ефективного запобігання інцидентам або мінімізації наслідків потенційних катастроф, пов'язаних із використанням ХБРЯ агентів.

Метою даного дослідження є аналіз еволюції ХБРЯ небезпек та окреслення змін характеру загроз у майбутньому в контексті швидкого розвитку і впровадження новітніх технологій. Вивчення впливу науково-технічного прогресу на ХБРЯ середовище дозволить своєчасно оцінити потенційні ризики та небезпеки, пов'язані з розширенням спектра загроз, а також сприятиме підвищенню ефективності заходів із запобігання й реагування на них.

Результати

Еволюція ядерної зброї

Початок ядерної ери, що стартував із першого випробування ядерної зброї 16 липня 1945 року, характеризувався сприйняттям ядерної зброї як різновиду звичайних бомб із суттєво вищою руйнівною силою. До середини 1950-х років військові стратегії ядерних держав не передбачали чіткої диференціації між застосуванням звичайної та ядерної зброї. Усвідомлення глобальної загрози, яку несе ядерна зброя для безпеки людства та розвитку цивілізації, формувалося поступово. Переломним моментом стала Корейська війна, що продемонструвала перехід ядерної зброї з розряду виключно військового засобу у сферу політичного тиску, стримування та дипломатії. Карибська криза стала другою важливою віхою, що спонукала провідні держави до усвідомлення необхідності правового регулювання та глобального контролю над розповсюдженням ядерної зброї та відповідних технологій [11].

З часу першого застосування ядерної зброї кількість ядерних випробувань перевищила 2000, з яких 528 було здійснено над поверхнею землі. Ці випробування сприяли постійному вдосконаленню ядерного арсеналу. Уже на початку 1950-х років було створено термоядерні бомби, що використовували реакції синтезу та поділу, забезпечуючи багаторазово більший вихід енергії порівняно з першими ядерними зразками. У середині 1970-х років з'явилися нейтронні боєприпаси, що мали відносно невелику вибухову силу, але генерували надзвичайно потужне радіаційне випромінювання [12].

Після Другої світової війни ядерні держави активно модернізували свій ядерний потенціал і засоби його доставки. У 1940–1950-х роках основними носіями були стратегічні бомбардувальники (США: Boeing B-29, B-50, B-52 Superfortress, Convair B-36 Peacemaker, B-47 Stratojet; СРСР: Ту-4, Ту-16, Ту-95; Велика Британія: Vickers Valiant, Handley Page Victor), здатні доставляти ядерні та термоядерні бомби на великі відстані. Також використовувалися надводні кораблі, здатні нести ядерні артилерійські боєприпаси.

Із появою крилатих (Regulus I) і балістичних ракет (Polaris A-1, P-13, P-21, P-27) спектр засобів доставки розширився за рахунок підводних човнів (США: USS Tunny (SSG-282), USS George Washington; СРСР: К-19 проекту 658, К-129 проекту 629), що мали ракети з дальністю польоту від 1000 до 3000 км.

У кінці 1950-х — на початку 1960-х років розпочалася розробка міжконтинентальних балістичних ракет (МБР) з ядерними боєголовками. Перші зразки (СРСР: Р-7, SS-6, Р-16; США: SM-65 Atlas, LGM-25C Titan II) забезпечували доставку зарядів потужністю 3–9 Мт на відстань від 8800 до 15000 км. Перші МБР запускалися зі стаціонарних платформ, однак із підвищенням уразливості таких об'єктів ракети почали розміщувати у захищених шахтах.

Із кінця 1960-х років почалася розробка мобільних комплексів для запуску МБР (СРСР: РТ-2П, РС-10 "Піонер", РТ-2ПМ "Тополь"; КНР: DF-4) із дальністю пуску 5500–10500 км, а також залізничних комплексів (СРСР: РТ-23УТТХ "Молодець") з дальністю до 11000 км. Паралельно розроблялися балістичні ракети для підводних човнів (СРСР: Р-29, Р-29Р, Р-29РМ) з декількома боєголовками, високою точністю наведення та можливістю ураження кількох цілей одночасно.

У подальшому зусилля ядерних держав були спрямовані на зменшення розмірів боєзарядів та інтеграцію їх у широкий спектр носіїв, що дозволяло застосовувати їх на полі бою. У 1970–1980-х роках поряд зі стратегічною зброєю розвивалася тактична ядерна зброя (ТЯЗ) з потужністю від 1 до 100 кт, призначена для обмеженого застосування по тактичних цілях, мінімізуючи супутні втрати серед цивільного населення [11]. Носіями ТЯЗ були артилерія, авіаційні та крилаті ракети, ракети малої та середньої дальності, торпеди та глибинні бомби.

Технологічний прогрес у мініатюризації привів до створення компактних ядерних пристроїв, таких як портативні заряди для спецоперацій Mk-54 SADM (вага 27 кг, потужність 0,1–1 кт) і “ядерні рюкзаки” (30 кг, 0,5–2 кт).

У 2013 році з’явилися відомості про нібито випробування СРСР компактних боєприпасів на основі Каліфорнію-251, проте через надзвичайно високу вартість ізотопу їх широке виробництво залишилось нереалізованим.

На сьогодні реальні ядерні кулі для АК не створено, однак розвиваються інші концепції, зокрема використання радіологічної зброї — куль із урановими осерддями або полонієвими отруйними елементами, а також “брудних бомб”, що можуть спричинити радіаційне зараження.

Стратегічна ядерна зброя залишається ключовим елементом глобального стримування. Водночас ризики застосування тактичної ядерної зброї у конфліктах зберігаються, причому її застосування може призвести до неконтрольованої ескалації та розгортання повномасштабної ядерної війни.

Станом на 2023 рік, згідно з даними Стокгольмського міжнародного інституту дослідження проблем миру (SIPRI), США, росія, Велика Британія, Франція, Китай, Індія, Пакистан та КНДР продовжують модернізацію своїх ядерних арсеналів. Сучасні тенденції розвитку ядерної зброї включають мініатюризацію боєголовок, удосконалення мобільних систем доставки, підвищення точності навігаційних систем і впровадження гіперзвукових технологій.

Росія, зокрема, планує до 2025–2030 років розгорнути гіперзвуковий бойовий блок “Авангард” із ракетою РС-28 “Сармат” (потужність 1–2 Мт, дальність понад 10000 км, швидкість понад 20 Махів), а також розробляє стратегічну крилату ракету “Буревісник” із ядерним двигуном. США модернізують тактичні ядерні бомби B61-12 і B61-13 та розробляють морську крилату ракету SLCM-N. Франція продовжує розробку атомних підводних човнів третього покоління та нових крилатих ракет повітряного базування.

Еволюція хімічних небезпек

Аналіз застосування хімічної зброї свідчить про проходження нею кількох етапів розвитку [13].

Перше покоління хімічної зброї бере початок із розвитком органічної та неорганічної хімії у XVIII–XIX століттях, що сприяло створенню штучних отруйних речовин. У 1774 році в ході хімічного експерименту був отриманий хлор, у 1812 році — фосген, а у 1822 році — іприт. У першій половині XIX століття синтезували численні речовини, які стали основою для майбутніх бойових отруйних речовин: у 1811 році — ціаноген; у 1820-х роках — стрихнін і морфін (попередники нейротоксинів); у 1854 році — нітрофенол (попередник фосфорорганічних сполук). Також розпочалося дослідження механізмів дії отрут на живі організми.

У цей період зафіксовано випадки застосування отруйних речовин у військових конфліктах: використання отруйного диму французькими військами під час колоніальної війни проти населення Марокко (1844–1845 роки); застосування миш'яку та сірчистого газу англійською армією у 1856 році під час Кримської війни для викурювання російських гарнізонів із фортифікаційних споруд під час облоги Севастополя; застосування пікринової кислоти англійцями під час англо-бурської війни наприкінці XIX століття.

Офіційним початком масового використання хімічної зброї в бойових діях вважається 22 квітня 1915 року, коли німецькі війська під час Першої світової війни здійснили газову атаку біля містечка Іпр, встановивши на фронті завширшки 6 км близько 6000 балонів, що містили 180 тонн хлору, і випустивши газ у напрямку французьких позицій. Саме з цього моменту розпочалася епоха “війни газу з протигазом”.

Надалі французькі (1916 рік) та англійські (1917 рік) війська також використовували хімічні речовини проти німецької армії. Французи застосовували суміші фосгену з

чотирихлористим оловом і трихлористим миш'яком, а також комбінацію синильної кислоти з трихлористим миш'яком. Англійці використовували рідкий дифосген і хлорпікрин. Німецькі війська 13 липня 1917 року вперше застосували іприт. Загалом, у період з квітня 1915 до листопада 1918 року, німці здійснили понад 50 газобалонних атак, англійці — 150, французи — 20. Було вироблено близько 180 тис. тонн отруйних речовин. Загальні втрати внаслідок застосування хімічної зброї оцінюються у 1,3 млн осіб, з яких до 100 тисяч загинули.

Завершенням етапу хімічної зброї першого покоління стало створення азотистих іпритів. До цього покоління належать три групи отруйних речовин:

- стійкі отруйні речовини шкірно-наривної та загальнотоксичної дії (сірчаний і азотисті іприти — HD та HN);
- нестійкі отруйні речовини (фосген (CG), дифосген (DP), синильна кислота (AC), люїзит (L));
- речовини подразливої дії — іританти (адамсит (DM), дифенілхлорарсин (DA), хлорпікрин (PS), дифенілціанарсин (DC), 2-хлорбензальмалононітрил (CS)).

До хімічної зброї першого покоління також відносять психотропні речовини-інкапаситанти (наприклад, LSD) та лакриматори (наприклад, хлорацетофенон (CN)), які викликали тимчасову втрату боєздатності особового складу противника.

Основними характеристиками хімічної зброї першого покоління були висока летальність за умови масового застосування та потужний психологічний вплив на особовий склад, що призводив до переляку, паніки й деморалізації. Одночасно це стимулювало розвиток засобів індивідуального захисту (протигазів, захисних костюмів) і сприяло формуванню наступних поколінь хімічної зброї.

Починаючи з 1932 року, у різних країнах розпочалися інтенсивні дослідження фосфорорганічних отруйних речовин нервово-паралітичної дії — хімічної зброї другого покоління (1930–1950-ті роки). У Німеччині були створені:

- 1936 рік — табун (GA);
- 1938 рік — зарин (GB);
- 1944 рік — зоман (GD).

У цей період було вдосконалено люїзит і включено його до бойових арсеналів. У 1950-х роках у США, в межах програм психологічної війни, був розроблений 3-квіноцилідініл бензилат (BZ). Також розвивалися нові засоби застосування хімічної зброї, зокрема хімічні боеприпаси.

Створення хімічної зброї другого покоління стало результатом цілеспрямованого наукового підходу, заснованого на нових знаннях в органічній хімії, біохімії та токсикології. Вперше було здійснено спробу створити хімічну зброю на основі глибокого розуміння фізіології людини. Почалися системні дослідження фосфорорганічних сполук з метою підвищення їхньої токсичності, проникності через шкіру та легені й стійкості у довкіллі.

Виробництвом та накопиченням хімічної зброї у цей період займалися Німеччина, США, СРСР, Японія, Велика Британія та Італія. Після доведення високої ефективності хімічної зброї у Першій світовій війні вона стала символом "технологічної війни". У 1930-х роках, на тлі неминучості нової глобальної війни, провідні країни світу (особливо Німеччина, СРСР і США) активно готувалися до використання усіх типів зброї масового ураження, включно з хімічною. Паралельно здійснювалося масове виготовлення засобів індивідуального захисту, систем фільтрації повітря та регулярно проводилися навчання із захисту від хімічних атак. Хімічна зброя стала невід'ємною частиною бойового планування.

Таким чином, відбувалася цілеспрямована підготовка держав до можливості хімічної війни, яка, втім, не набула масштабного характеру у Другій світовій війні завдяки взаємному стримуванню. Однак розробки хімічної зброї тривали, що призвело до появи ще більш небезпечних бойових отруйних речовин у XX столітті.

Холодна війна стала каталізатором гонки озброєнь, спрямованої на створення нових типів зброї масового ураження, включаючи хімічну зброю. Держави прагнули розробити хімічні агенти з високою токсичністю, стійкістю та можливістю прихованого застосування. У цей період формується хімічна зброя третього покоління (1950–1980 роки).

У 1952 році у Великій Британії було синтезовано речовину VG, що започаткувала розробку новітніх нервово-паралітичних агентів серії V. У тому ж році був створений VX, а в СРСР у 1963–1965 роках синтезовано VR (також відомий як “P-33”) — аналог VX, а у 1970-х роках — GV, що поєднував властивості агентів серій G і V.

Хімічна зброя третього покоління включала не лише нові типи токсичних речовин, а й удосконалені засоби їх застосування, зокрема касетні артилерійські та авіаційні боєприпаси, а також бойові хімічні частини ракет ближнього і середнього радіусу дії.

У 1960–1970-х роках внаслідок пошуків безпечніших і ефективніших способів зберігання, транспортування та застосування токсичних речовин була створена бінарна хімічна зброя. З’явилися перші серійні бінарні системи: VX2 для VX та GB2 для зарину (GB). Бінарні системи започаткували нову еру “інтелектуальної” хімічної зброї, яка істотно ускладнювала її виявлення та контроль і стала прототипом сучасних засобів диверсійного ураження.

Найбільш інтенсивні роботи зі створення хімічної зброї третього покоління здійснювалися у СРСР у 1973–1976 роках. Вироблені запаси хімічних боєприпасів дозволяли забезпечити багатотисячні смертельні дози на кожного жителя планети.

Хімічна зброя третього покоління відіграла ключову роль в еволюції нервово-паралітичних агентів ХХ століття, поєднуючи високу бойову ефективність, стійкість до впливу зовнішнього середовища, складність виявлення та ефективність навіть за умов точкового застосування. В умовах Холодної війни вона використовувалася не лише як тактичний засіб ураження, але й як важливий елемент психологічного та стратегічного стримування.

Після створення хімічної зброї третього покоління розпочався пошук шляхів подальшого підвищення її бойових характеристик. На основі цих напрацювань було започатковано розробку хімічної зброї четвертого покоління (1980-ті роки — дотепер).

Попри те, що США у 1969 році офіційно оголосили про припинення виробництва хімічної зброї, СРСР зробив це лише у 1987 році. До цього часу, в межах програми “Фоліант”, були розроблені, випущені у дослідних партіях та випробувані новітні отруйні речовини серії “Новичок”, які успадкували ключові риси V-серії, однак були виведені на якісно новий рівень.

У кінці 1970-х років у Вольському філіалі Державного науково-дослідного інституту органічної хімії та технології у Шиханах були синтезовані агенти “A-232”, “A-230”, “A-234”, що мали надзвичайно високу токсичність (приблизно у десять разів вищу за VX), складність виявлення та можливість застосування у бінарній формі. На початку 1990-х років були розроблені бінарні токсичні агенти “Новичок-5” і “Новичок-7”.

Отруйні речовини четвертого покоління поєднали надзвичайну токсичність, стійкість, бінарність, високу проникність, складність виявлення та ідентифікації, що забезпечує ідеальну адаптацію до прихованого і точкового застосування та утруднює лікування. Їх поява відкрила нову еру загроз — невидимих, непередбачуваних та з великим потенціалом для зловживань.

На сьогодні науково-дослідні роботи з удосконалення та створення нових зразків хімічної зброї тривають. У світі понад 30 держав володіють технологіями або потенціалом для створення хімічної зброї [25]. Розвиток науки робить створення нових високотоксичних речовин та вдосконалення засобів їх доставки цілком реальним завданням.

Таким чином, еволюція хімічної зброї свідчить про її постійне вдосконалення в аспектах ефективності, прихованості та здатності обходити засоби захисту й міжнародні заборони. На кожному історичному етапі хімічна зброя:

- ставала дедалі небезпечнішою, зменшуючи необхідну дозу для ураження;

- набувала нових форм застосування — від примітивних газів до високотоксичних аерозолів і речовин шкірно-нервової дії;
- адаптувалася до вимог сучасного поля бою, зокрема в умовах гібридних воєн і терористичних актів;
- дедалі частіше маскувалася під мирну діяльність через використання технологій подвійного призначення.

Хімічна зброя трансформувалася від засобу масового ураження до інструмента високоточного, гібридного та потенційно терористичного застосування, що робить її особливо небезпечною у глобалізованому безпековому середовищі XXI століття.

Водночас хімічні загрози не обмежуються виключно хімічною зброєю. До них належать також ризики, пов'язані з виробництвом, транспортуванням і використанням токсичних хімічних речовин у промисловості. Аварії на хімічних підприємствах, як-от у Севезо (1976 р., Італія), Бхопалі (1984 р., Індія) та Бейруті (2020 р., Ліван), призвели до значних людських жертв і тривалого забруднення довкілля, за масштабами наслідків прирівнюючись до застосування хімічної зброї.

Еволюція хімічної промисловості пройшла кілька ключових етапів, що були зумовлені як науковими відкриттями, так і технологічними інноваціями:

Перший етап — період наукових відкриттів (XVIII — початок XIX століття).

У цей період формувалися основи хімічної науки: А. Лавуазьє сформулював закон збереження маси та описав хімічні реакції з наукової точки зору; Д. Прістлі й К. Шеєле відкрили кисень; Дж. Дальтон розробив атомну теорію хімічних сполук. Хімія набула рис самостійної науки, що заклала підвалини для розвитку промислових технологій. Промислова революція стимулювала створення перших хімічних виробництв, що забезпечило основу для майбутніх досягнень у галузі синтетичних матеріалів, фармацевтики та технічної хімії.

Другий етап — період індустріальної хімії (XIX — початок XX століття).

Відбувся стрімкий розвиток хімічної промисловості завдяки науковим відкриттям, індустріалізації та формуванню нових виробничих галузей. Створення великих хімічних корпорацій, таких як BASF, Bayer, DuPont, IG Farben, сприяло розширенню хімічного виробництва. Інтенсивно розвивалася органічна хімія, було започатковано виробництво синтетичних матеріалів, упроваджено синтез аміаку та створено перші пластмаси й полімери. Хімія набула вагомого значення у військовій справі (винайдення динаміту, виробництво тринітротолуолу, створення бойових отруйних речовин). Поряд із досягненнями індустріалізація хімічної промисловості породила нові загрози — зокрема, масштабне хімічне забруднення довкілля.

Третій етап — період масового виробництва (друга половина XX століття).

Цей етап ознаменувався глобалізацією виробництва хімічних речовин і масовим поширенням хімічних технологій у всіх сферах життя — економіці, медицині, сільському господарстві, військовій справі. Зросли обсяги інвестицій у наукові дослідження, що сприяло відкриттю нових матеріалів, хімічних каталізаторів та біотехнологій. Водночас масове виробництво синтетичних матеріалів, розвиток нафтохімії, біохімії та агрохімії призвели до суттєвого забруднення атмосфери, водних ресурсів і ґрунтів. Саме в цей період були закладені основи для модернізації хімічної промисловості й пошуку рішень щодо екологічних проблем.

Четвертий етап — період екологічної переоцінки (друга половина XX — початок XXI століття). Стрімке зростання екологічних ризиків, пов'язаних із хімічним виробництвом, призвело до усвідомлення необхідності реформування підходів до промислового розвитку. Масове використання отруйних хімікатів, пластмас, пестицидів і промислових викидів стало причиною численних екологічних катастроф. У 1970-х роках виникли перші міжнародні ініціативи, спрямовані на зменшення промислового впливу на довкілля. У 1990-х роках була сформульована концепція “зеленої хімії”, яка орієнтувалася на мінімізацію шкідливих

відходів, використання відновлюваної сировини та безпечних технологій. Хімічна промисловість почала активно адаптуватися до нових екологічних вимог, а міжнародне регулювання стало загальноприйнятою практикою.

П'ятий етап — сучасний період (XXI століття — дотепер).

Хімічна промисловість продовжує розвиватися під впливом новітніх технологій, глобальних викликів і посилення екологічних стандартів. Основними напрямками її еволюції є цифровізація виробничих процесів, впровадження екологічно безпечних рішень, використання біотехнологій, а також створення нових матеріалів із заданими унікальними властивостями.

Таким чином, еволюція хімічної промисловості засвідчує, що науково-технічний прогрес у цій сфері має двоїсту природу: з одного боку — сприяє інноваціям і технічному розвитку, з іншого — породжує нові небезпеки для життя, здоров'я людей і довкілля. Використання токсичних речовин у військових цілях, масштабні техногенні аварії, екологічне забруднення є прямими наслідками такого розвитку. Сьогодні, на тлі цифровізації, глобалізації та поширення технологій подвійного призначення, загрози хімічного характеру набувають дедалі складніших форм. У майбутньому вони можуть проявитися через кібератаки на хімічні об'єкти, терористичне використання отруйних речовин і синтез нових небезпечних хімічних сполук.

Еволюція біологічних небезпек

Сучасні експерти все частіше наголошують, що людство вступило в нову еру — еру реальної та постійно зростаючої загрози біологічних небезпек [14]. Їхня еволюція пройшла декілька ключових етапів — від примітивних методів давнини до високотехнологічних розробок у військових лабораторіях.

Перший період. Біологічна зброя давніх часів

У VI столітті до нашої ери асирійці отруювали колодязі житніми ріжками — смертельно отруйним грибом. Війська Олександра Македонського залишали на ворожій території тіла людей і коней, загиблих від інфекційних захворювань. Скіфські лучники змащували стріли кров'ю і тканинами розкладених трупів, використовуючи трупну отруту як ефективний засіб боротьби. У 1346 році татаро-монголи під час облоги генуезької фортеці Каффа (сучасна Феодосія) катапультивали через мури міста тіла померлих від чуми. Наслідком стало розповсюдження епідемії до Константинополя, Генуї, Венеції та інших середземноморських портів, що призвело до пандемії в Європі та на Близькому Сході. Біологічна зброя цього періоду, незважаючи на свою примітивність, забезпечувала масове ураження шляхом використання природних патогенів.

Другий період. Біологічна зброя у Першій та Другій світових війнах

Під час Першої світової війни німецькі агенти транспортували до США пластирі, заражені правцевими паличками, що призвело до спалахів правця. У 1933 році нацистська Німеччина розпочала інтенсивні дослідження біологічної зброї у Воєнному інституті мікробіології в Берліні, зокрема щодо використання збудника сибірки. Було запатентовано численні пристрої для розпилення біологічних агентів.

Під час Другої світової війни японський Загін №731 здійснював біологічні атаки проти Китаю, використовуючи збудників сибірки, холери, шигельозу, сальмонельозу й чуми. У СРСР з початку 1930-х років також велися секретні розробки біологічної зброї: створено 27 наукових установ, 6 виробничих підприємств і 7 резервних заводів. Дослідження охоплювали генну модифікацію бактерій чуми та створення гібридів натуральної віспи з вірусом гарячки Ебола.

У цей період розпочалися систематичні наукові дослідження біологічної зброї, формувалася відповідна інфраструктура, розроблялися методи розпилення патогенів для стратегічного військового застосування.

Третій період. Біологічна зброя в епоху “Холодної війни”

Після Другої світової війни США та СРСР значно розширили свої програми створення біологічної зброї. США здійснювали випробування збудників небезпечних захворювань у реальних умовах, розробляли аерозольні технології поширення патогенів та вивчали вірусні агенти як зброю. З метою тестування механізмів поширення біоагентів у міських умовах було проведено понад 239 секретних експериментів, серед яких операція “Sea-Spray” у Сан-Франциско та розпилення *Bacillus atrophaeus* у метро Нью-Йорка.

СРСР у 1973 році започаткував програму “Біопрепарат”, що під прикриттям цивільних досліджень займалася розробкою смертоносних біологічних агентів. Завдання програми включали генетичну модифікацію патогенів, створення антибіотикостійких штамів та випробування біозброї, зокрема на людях. Продуктивність радянських підприємств дозволяла масово виробляти високоефективні штами збудників, як-от сибірки та вірусу Марбург.

Аварії, що сталися на біологічних об'єктах, такі як витоки віспи на Аралі (1971) та сибірської виразки в Свердловську (1979), свідчать про високу небезпеку біологічних розробок навіть у мирний час. Незважаючи на підписання Женевського протоколу (1925) та Конвенції про заборону біологічної зброї (1972), таємні дослідження тривали.

Четвертий період. Біологічна зброя нового покоління (кінець ХХ століття — сучасність)

Попри офіційне припинення розробок біологічної зброї США та СРСР у другій половині ХХ століття, діяльність у цій сфері триває. За даними Державного департаменту США, Росія зберігає біотехнології подвійного призначення і може підтримувати програми наступальної біологічної зброї. Вважається, що КНДР активно працює над біологічною зброєю, а Іран здійснює дослідження у галузі біотехнологій із потенційним військовим застосуванням.

Досягнення генної інженерії зумовили появу нового покоління біологічної зброї, здатної вибірково вражати певні етнічні або расові групи. Сучасні технології дозволяють змінювати ДНК та РНК мікроорганізмів, створюючи патогени з новими властивостями.

Серед природних або випадкових біологічних загроз ХХІ століття слід відзначити пандемію свинячого грипу (2009–2010), епідемії Еболи (2014–2016, 2018–2020), Близькосхідний респіраторний синдром (з 2012 року) та пандемію COVID-19 (з 2019 року), а також спалах віспи мавп (з 2022 року). Ці події доводять здатність біологічних загроз руйнувати суспільства та вимагати значних ресурсів для подолання наслідків.

Очікується, що зміна клімату сприятиме пришвидшенню появи нових зоонозних захворювань і підвищенню ризику пандемій.

Еволюція біологічних небезпек — від отруєння води до створення генно-інженерних вірусів — свідчить про зростаючу серйозність цієї загрози. Незважаючи на міжнародні заборони, технологічний прогрес підвищує імовірність використання біологічної зброї, що вимагає глобального моніторингу, прозорості наукових досліджень та посилення міжнародного контролю у сфері біотехнологій.

Проведене дослідження еволюції ХБРЯ-небезпек — від перших згадок до сучасності — дозволяє стверджувати, що ці загрози не зникають, а, навпаки, постійно еволюціонують. Прогрес у науково-технічній сфері на кожному етапі змінював характер ХБРЯ-небезпек, роблячи їх дедалі серйознішими: від розщеплення атома до термоядерних бомб мегатонного класу, від отруйних стріл до токсичних речовин четвертого покоління, від трупної отрути до масштабних вірусних пандемій. У сучасних умовах розвиток науки й технологій ще більше розширює спектр потенційних ХБРЯ-загроз, збільшуючи ризики для безпеки людства.

Технології, що викликають особливе занепокоєння в короткостроковій перспективі, включають:

1. Впровадження елементів штучного інтелекту (ШІ). Штучний інтелект суттєво впливає на розширення спектра ХБРЯ загроз [16], підвищуючи можливості як у сфері захисту, так і щодо потенційного застосування нових видів загроз. Використання ШІ дозволяє

розробляти алгоритми для моделювання ефективності ядерних реакцій, що може сприяти створенню нових типів ядерної зброї. Також ШІ застосовується для розробки та синтезу небезпечних хімічних речовин, оптимізації існуючих агентів, прогнозування токсичності сполук і підвищення їх ефективності як засобів хімічного ураження. У біологічній сфері штучний інтелект використовується для редагування ДНК, моделювання вірусів і бактерій, що створює передумови для виникнення нових біологічних загроз. Алгоритми ШІ дозволяють аналізувати геномні дані для прогнозування ефективності патогенів.

2. Зростання ролі безпілотних систем. Безпілотні системи істотно розширюють можливості застосування ХБРЯ агентів, створюючи нові виклики для систем безпеки та захисту [6, 17, 18, 22]. Використання безпілотників для доставки або розпилення небезпечних речовин забезпечує нові способи проведення атак, змінюючи традиційну тактику. Завдяки можливості прихованого транспортування на низьких висотах і в умовах поганої видимості, безпілотні системи ускладнюють виявлення атак та забезпечують рівномірний розподіл ХБР агентів, підвищуючи ефективність зараження. Вони можуть здійснювати прицільні атаки на місця масового скупчення людей або важливі об'єкти інфраструктури, доставляючи радіоактивні матеріали, бактерії, віруси чи токсини у повітря або водні джерела, що підвищує ризик масштабного зараження. Крім того, безпілотні системи можуть збирати розвідувальні дані про ХБР об'єкти для планування диверсій або атак, а також безпосередньо їх уражати, що може призвести до значних екологічних та гуманітарних наслідків.

3. Активне впровадження кібертехнологій. Дії у кіберпросторі створюють можливості для дистанційного впливу на технологічні процеси об'єктів, що працюють із ХБРЯ агентами, а також на їхні системи управління [19]. Кібератаки на об'єкти хімічного виробництва, біотехнологічні центри, лабораторії або системи управління ядерними об'єктами можуть призвести до неконтрольованого викиду небезпечних речовин, що спричинить масштабне зараження навколишнього середовища. Ураження систем управління та охолодження на атомних електростанціях може викликати катастрофи, аналогічні Чорнобильській або Фукусімській. Кібератаки також можуть виводити з ладу системи фізичного захисту об'єктів, відкриваючи можливості для фізичних атак або крадіжки ХБР матеріалів, а також використовуватися для саботажу або шантажу шляхом ураження критично важливих систем.

4. Розвиток технологій 3D-друку (адитивне виробництво). Технології 3D-друку відкривають можливості для виготовлення складних компонентів, зокрема для створення мініатюрних хімічних реакторів, обладнання для синтезу небезпечних речовин, лабораторного обладнання (центрифуг, інкубаторів, мікрофлюїдних систем), а також систем транспортування і розпилення ХБР агентів [21, 22]. Зокрема, за допомогою 3D-принтерів можливо виготовляти компоненти для "брудних бомб" або центрифуг для збагачення урану. Простота використання, відносна дешевизна, децентралізований характер виробництва та складність контролю за поширенням 3D-друкованих елементів створюють серйозні виклики для міжнародної безпеки, особливо у контексті держав, що перебувають під міжнародними санкціями.

5. Темна павутина (даркнет). Темна павутина, або даркнет, є прихованим сегментом Інтернету, доступ до якого здійснюється через спеціалізоване програмне забезпечення і який не індексується традиційними пошуковими системами. Вона слугує платформою для анонімного спілкування та обміну інформацією, пов'язаною з незаконною діяльністю, включаючи обіг матеріалів подвійного призначення, технологій та компонентів для створення ХБРЯ зброї [6]. На ринках даркнету пропонуються на продаж небезпечні матеріали та обладнання, необхідні для виготовлення ХБРЯ засобів. Транзакції зазвичай здійснюються за допомогою криптовалют (зокрема Bitcoin), що ускладнює їхнє відстеження і контролювання з боку правоохоронних органів. Існує також загроза використання даркнету як платформи для об'єднання терористичних груп із фахівцями, які володіють необхідними знаннями для розробки ХБРЯ зброї.

Нанотехнології. Нанотехнології являють собою інноваційну галузь науки, що оперує матеріалами з розмірами в діапазоні від 1 до 100 нанометрів. Завдяки можливості маніпулювання речовинами на молекулярному та атомному рівнях, нанотехнології потенційно розширюють спектр хімічних, біологічних, радіологічних та ядерних (ХБРЯ) загроз. Використання нанотехнологій відкриває можливості для створення ХБРЯ зброї нового покоління, яка характеризується ускладненим виявленням та нейтралізацією. Зокрема, наночастинки здатні підвищувати токсичність хімічних агентів та їхню проникність через захисні бар'єри. Нанокапсули забезпечують контрольоване вивільнення хімічних чи біологічних агентів у визначеному місці або в заданий час. Слід зазначити, що деякі наночастинки мають настільки малі розміри, що їх ідентифікація традиційними методами виявлення ускладнена, що підвищує їхню ефективність у хімічних атаках та ускладнює детекцію й нейтралізацію. Крім того, наночастинки можуть посилювати вірулентність патогенів, підвищуючи їхню стійкість до імунної відповіді організму. Також, зазначені частинки можуть бути використані для створення аерозолів, що містять радіоактивні матеріали, які здатні легко поширюватися та проникати в організм. Наноструктуровані матеріали спрощують створення більш компактною ядерної зброї та дозволяють підвищувати ефективність ядерних боєголовок завдяки покращенню характеристик вибухових речовин. Розвиток нанотехнологій відкриває можливості для створення мініатюрних детекторів ядерних матеріалів, які можуть бути використані для приховування нелегальної ядерної діяльності.

Фізика високих енергій. Фізика високих енергій – це галузь фізики, що досліджує властивості та взаємодію субатомних частинок при надзвичайно високих енергіях [10]. Вона сприяє розвитку сучасних технологій у ядерній енергетиці, військовій промисловості та медицині. Разом із цим, фізика високих енергій також потенційно розширює спектр ХБРЯ загроз.

Експерименти з високими енергіями можуть призводити до утворення хімічних сполук або матеріалів з унікальними властивостями, які можуть бути використані для створення високотоксичних речовин. Дослідження процесів вибуху на рівні молекулярних структур можуть сприяти створенню ефективніших хімічних вибухових пристроїв. Високі енергії можуть викликати мутації у вірусах і бактеріях, що створює можливість для розробки нових біологічних загроз, зокрема стійких і важко контрольованих патогенів. Фізичні методи, що базуються на використанні високих енергій, можуть бути застосовані для створення систем доставки біологічних агентів у аерозольній формі.

Дослідження в галузі фізики високих енергій дозволяють створювати компактні та ефективні ядерні боєголовки, що значно удосконалює ядерну зброю, роблячи її важчою для виявлення та транспортування. Також з'являється можливість удосконалення боєголовок з використанням нового типу детонаційних хвиль, що підвищують потужність вибуху без збільшення розмірів заряду. Використання передових детонаційних технологій підвищує ефективність ядерного вибуху. Зазначена технологія сприятиме покращенню конструкції термоядерних пристроїв (водневих бомб), що використовують ядерний синтез для досягнення значно більшої руйнівної потужності. Фізика високих енергій сприяє створенню "брудних бомб" та нестабільних ізотопів із високою радіоактивністю, які можуть використовуватися для забруднення територій. Завдяки дослідженням із високими енергіями можна розробляти методи для оптимального розсіювання радіоактивних частинок на великих площах.

Квантові технології. Незважаючи на позитивний потенціал для науки та промисловості, квантові технології також можуть розширити спектр ХБРЯ загроз. Квантові комп'ютери здатні моделювати складні ядерні, хімічні та біологічні реакції з високою точністю. Це може сприяти розробці більш ефективних та компактних ядерних боєголовок. Квантові алгоритми дозволяють оптимізувати відомі отруйні агенти з метою підвищення їхньої токсичності або створювати нові високотоксичні хімічні сполуки з новою молекулярною

структурою, що ускладнює їх виявлення існуючими детекторами. За допомогою квантових технологій стає можливим створення нових патогенів із заданими характеристиками, що підвищує ризик біологічної зброї. Квантові комп'ютери можуть порушити безпеку систем управління та контролю над ядерною зброєю. Крім того, за допомогою таких комп'ютерів можуть бути зламані сучасні системи захисту даних, що охороняють інформацію про ядерні технології. Квантові алгоритми, зокрема алгоритм Шора, можуть розшифрувати криптографічні ключі, які використовуються для захисту даних про ядерні технології, що створює загрозу витоку конфіденційної інформації про ядерні програми або іншої секретної інформації про ХБРЯ технології.

Синтетична біологія та біотехнології. Синтетична біологія та біотехнології передбачають використання штучного інтелекту, молекулярної біології, біохімії, інженерії та біоінформатики для моделювання, проектування та синтезу біологічних систем. Передові технології даної сфери можуть спричинити появу нових видів біологічної зброї. Використання штучного інтелекту та генетичних баз даних дозволить розробляти нові агресивні віруси та бактерії, що матимуть більш стійкі характеристики до навколишнього середовища. З розвитком біотехнологій з'являється можливість створення патогенів із високою смертністю або спрямованістю на певні групи населення. Наприклад, одна з програм штучного інтелекту, яка спочатку була розроблена для фармацевтичних досліджень, змогла згенерувати понад 40 000 потенційних нових токсинів всього за шість годин. Модифікація бактерій для стійкості до антибіотиків може зробити лікування інфекцій утрудненим або навіть неможливим. Крім того, існують потенційні можливості використання синтетичної біології для створення бактерій або клітин, які можуть виробляти хімічні отруйні речовини, наприклад, нервово-паралітичні агенти. Генетично модифіковані організми можуть самостійно продукувати такі токсини в природному середовищі, що ускладнює їх виявлення [20].

Використання ХБР агентів подвійного призначення. Хімічні, біологічні та радіаційні речовини, а також технології, що можуть бути використані як у цивільних, так і у військових цілях, визначаються як ХБР агенти подвійного призначення. Їхня амбівалентна природа розширює спектр ХБРЯ загроз, оскільки вони є відносно доступними, складними для контролю та легко адаптуються для створення ХБРЯ зброї. Значна кількість ХБР агентів подвійного призначення легально виробляється та широко використовується у промисловості та науці [20]. Наразі, розмежування між законною діяльністю з цими агентами та прихованою підготовкою до їх використання як ХБРЯ зброї є складним завданням. Розвиток нових методів синтезу, генної інженерії, біотехнологій та хімічного аналізу збільшує ризик та спрощує створення відповідної зброї в лабораторних умовах. Глобалізація суспільства сприяє міжнародним поставкам, що, в свою чергу, зумовлює неконтрольоване поширення ХБР агентів подвійного призначення та полегшує виробництво ХБРЯ зброї.

Як приклади таких ХБРЯ агентів можна навести:

- Фосген – важливий компонент для промислового синтезу пластмас, виробництва пестицидів, барвників, безводних оксидів металів, але також відомий як бойовий отруйний газ.
- Сибірка (*Bacillus anthracis*) – може використовуватися для створення біологічної зброї, але також застосовується у вакцинах та наукових дослідженнях.
- Цезій-137 – використовується для медичних цілей, але може бути використаний для створення радіологічної зброї.
- Центрифуги для збагачення урану – використовуються для виробництва палива для АЕС, але також можуть бути використані для створення збройового урану.

Таким чином, розвиток науково-технічної сфери дозволяє окреслити зміни характеру ХБРЯ загроз та оцінити потенційні ризики та небезпеки, пов'язані з ними, у майбутньому. Впровадження нових технологій значно розширює можливості для створення більш складних

і прихованих ХБРЯ загроз, а також дає змогу визначити потенційні сценарії їхньої реалізації. З огляду на вищезазначене, такі сценарії можуть бути представлені у таблицях 1-3.

Таблиця 1 – Основні сценарії загроз радіаційного та ядерного характеру

Ядерний тероризм	Розробка, виготовлення (в тому числі кустарно), захоплення та застосування ядерної бомби чи ядерного підривного пристрою
	Викрадення, контрабанда або незаконний обіг радіоактивних матеріалів
	Диверсійно-терористичні дії на ядерних об'єктах цивільного та військового призначення (хакерська атака, виведення з ладу технологічного обладнання, захоплення, мінування, вибух)
	Використання (в тому числі приховане) радіоактивних матеріалів чи бойових радіоактивних аерозолів в т.ч брудної бомби
	Поширення технологій виготовлення ядерної зброї чи засобів її доставки
Використання ядерної зброї державними суб'єктами	Навмисне застосування стратегічних ядерних сил
	Навмисне застосування не стратегічних ядерних сил
	Інциденти під час зберігання та поводження з ядерною зброєю
	Бойове зіткнення із застосуванням набоїв з ^{238}U
	Навмисне руйнування радіаційно-небезпечних об'єктів на території іншої держави
Ядерні, радіаційні аварії та інциденти на радіаційно-небезпечних об'єктах	Аварії на АЕС
	Аварії під час перевезення та транспортування радіоактивних матеріалів
	Інциденти під час зберігання та використання радіоактивних матеріалів
	Неконтрольований викид радіоактивних аерозолів
Забруднення навколишнього середовища	Радіоактивне зараження місцевості після ядерних інцидентів
	Розпилення радіоактивних матеріалів в атмосфері
	Розчинення радіоактивних матеріалів в поверхневих чи підземних водах
	Змішування радіонуклідів з харчовими продуктами
Ядерний шантаж для досягнення політичних чи економічних цілей	Прямий ядерний шантаж (загроза безпосереднього застосування ядерної зброї)
	Опосередкований ядерний шантаж (демонстративне підвищення бойової готовності ядерних сил або випробування ядерних боєголовок)
	Ядерний шантаж пов'язаний з радіаційно-небезпечними об'єктами

Таблиця 2 – Основні сценарії загроз хімічного характеру

Аварії та інциденти на хімічно-небезпечних об'єктах	Аварії на хімічно-небезпечних об'єктах
	Аварії чи інциденти під час перевезення та транспортування ОХР, ОНХР, НХР
	Неправильне поводження з ОХР, ОНХР, НХР
Хімічний тероризм	Диверсії на хімічно небезпечних об'єктах (хакерська атака, виведення з ладу технологічного обладнання, захоплення, мінування, вибух)
	Навмисне використання БОР, ОХР, ОНХР, НХР
	Придбання, викрадення, контрабанда або незаконний обіг БОР, ОХР, ОНХР, НХР
	Розробка, виробництво, імпорт БОР, ОХР, ОНХР, НХР (в тому числі хімічних речовин подвійного використання)
	Поширення технологій виготовлення хімічної зброї чи засобів її доставки
Використання хімічної зброї державними суб'єктами	Створення та накопичення хімічної зброї
	Навмисне застосування хімічної зброї
	Інциденти під час зберігання та поводження з хімічною зброєю
	Навмисне руйнування ХНО на території іншої держави
	Забруднення місцевості після хімічних інцидентів (в тому числі і під час та після бойових дій)

Забруднення довкілля хімічними речовинами	Розпилення БОР, ОР, ОХР, ОНХР, НХР, в атмосфері
	Розчинення хімічних речовин у поверхневих та підземних водах
Хімічні катастрофи природного походження (виверження вулканів, підводні викиди нафти, викиди метану)	

Примітки:

БОР – бойові отруйні речовини, спеціально синтезовані або відібрані токсичні хімічні сполуки, призначені для застосування у військових цілях з метою ураження живої сили противника шляхом інгаляційного, шкірного або контактного впливу.

НХР – небезпечна хімічна речовина, що потенційно може завдати шкоду здоров'ю людини та/або довкіллю;

ОНХР – особливо небезпечна хімічна речовина, яка має мутагенні та/або канцерогенні властивості, та/або є токсичною для репродуктивної системи людини, та/або має здатність до руйнування ендокринної системи людини, та/або є стійкою, біоаккумулятивною і токсичною для довкілля;

ОХР – отруйна хімічна речовина, яка може спричинити виникнення гострого або відстроченого тяжкого отруєння, яке призводить до хвороб, порушення роботи систем організму або його загибелі, у разі її перорального надходження, потрапляння на шкіру або під час вдихання [24];

ХНО – хімічно-небезпечні об'єкти: підприємства хімічної, нафтопереробної, нафтоперегінної галузі; залізничні станції з парком для відстою потягів з отрутохімікатами; порти; підприємства харчової промисловості; підприємства целюлозно-паперової промисловості; водогінні і водоочисні станції, що використовують хлор (водоканал); підприємства, що використовують холодоагенти; склади та бази із речовинами для дезінфекції, дезінсекції, дератизації; склади з ракетним паливом, ракетні частини із шахтами; лабораторії, науково-дослідні інститути, де використовують НХР; склади та бази для зберігання НХР, отруйних речовин, отрутохімікатів [23].

Таблиця 3 – Основні сценарії загроз біологічного характеру

Аварії та інциденти на біологічно-небезпечних об'єктах	Аварії на біологічно небезпечних об'єктах
	Інциденти під час зберігання та використання біологічних агентів
	Аварії під час перевезення та транспортування біологічних агентів
	Інциденти на природних резервуарах патогенних мікроорганізмів
Природні та штучні спалахи інфекційних хвороб	Епідемія (інфекційне захворювання людини)
	Епізоотія (інфекційне захворювання тварини)
	Епітофітія (інфекційне захворювання рослин)
	Поява нових, мало або невивчених інфекцій
Біологічний тероризм	Диверсії на біологічно-небезпечних об'єктах (хакерська атака, виведення з ладу технологічного обладнання, захоплення, мінування, вибух)
	Навмисне використання патогенів
	Викрадення, контрабанда або незаконний обіг біологічних агентів
	Неправильне поводження з біологічними агентами
	Розробка, виробництво, імпорт, біологічних агентів (в тому числі подвійного використання)
	Поширення технологій виготовлення біологічної зброї чи засобів її доставки
Транскордонне перенесення патогенних мікроорганізмів	Неконтрольоване перенесення патогенних мікроорганізмів людиною
	Неконтрольоване перенесення патогенних мікроорганізмів (зоонозів) твариною
	Розповсюдження біотехнологій подвійного призначення
Забруднення навколишнього середовища біологічними агентами	Біологічне забруднення ґрунтів
	Біологічне забруднення атмосфери
	Біологічне забруднення поверхневих та підземних вод
	Біологічні інвазії
Застосування біологічної зброї державними суб'єктами	Створення або генерація, біологічної зброї
	Відкрите застосування біологічної зброї
	Приховане застосування біологічної зброї
	Гібридне застосування біологічної зброї

	Навмисне руйнування біологічно небезпечних об'єктів на території іншої держави
	Генетичний геноцид

Висновки

На формування сучасного безпекового середовища, окрім політичних, екологічних, демографічних, географічних та економічних факторів, значний вплив має розвиток і доступність новітніх технологій. ХБРЯ сфера не є винятком. Прискорене впровадження технологічного прогресу в цій галузі ставить під сумнів попередні оцінки ризиків, пов'язаних із ХБРЯ загрозами.

Проведений аналіз еволюції ХБРЯ небезпек демонструє, що вони були, є і залишаються постійною загрозою протягом історії людства – як під час збройних конфліктів, так і в мирний час, незважаючи на відносну стриманість та міжнародні угоди. Глобальна і регіональна загроза ХБРЯ агентів зростає через розширення можливостей випадкового вивільнення або навмисного застосування всупереч світовому порядку, заснованому на правилах, а також через зловмисне використання технологій подвійного призначення.

Новітні технології трансформували всі аспекти життєдіяльності. Водночас, вони можуть бути не лише засобами реалізації потенційних ХБРЯ загроз, але й відігравати ключову роль у запобіганні, виявленні та реагуванні на ці загрози.

В епоху постійної еволюції загроз, здатність ефективно реагувати на них є надзвичайно важливою. У цьому контексті технологічний розвиток відкриває широкі можливості для посилення ХБРЯ захисту шляхом впровадження нових, вдосконалених та економічно ефективних рішень, що є запорукою безпеки та оперативного реагування на сучасні ХБРЯ загрози. Використання штучного інтелекту та аналізу великих даних сприятиме прогнозуванню можливих атак із застосуванням ХБРЯ агентів та оптимізації заходів реагування. Роботизовані системи та безпілотні апарати можуть стати ефективним інструментом для виявлення та реагування на ХБРЯ інциденти, виконуючи небезпечні завдання дистанційно, забезпечуючи підвищений рівень безпеки як для військовослужбовців, так і для цивільного населення. Інноваційні підходи до дезактивації та нейтралізації забруднень забезпечать ефективніше усунення загроз. ХБРЯ захист необхідно розглядати як інтегровану систему з взаємозалежними компонентами. Окремі сили, засоби та технології повинні оцінюватися з точки зору їхнього впливу на всю систему ХБРЯ захисту, а також на інші оборонні сили та засоби, а не розглядатися ізольовано. Розвиток ХБРЯ сил і засобів має бути невід'ємною частиною оборонного планування та забезпечувати державі надійний інструмент для протидії новітнім загрозам [8].

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Nikolay I. Padarev. Chemical, biological, radiological and nuclear threats in the hybrid war context. International scientific journal "Science, business, society". WEB ISSN 2534-8485. 2019. Republic of Bulgaria. P.118-119.
2. NATO's Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Defence. NATO 2022. URL: https://www.nato.int/cps/fr/natohq/official_texts_197768.htm?selectedLocale=e [дата звернення 19.02.25].

3. Su, F., Anthony, I. Reassessing CBRN. Threats in a Changing Global Environment. Stockholm international peace research institute. June 2019. URL: <https://www.jstor.org/stable/resrep24499> [дата звернення 26.02.25].
4. Condition (10)(C) Annual Report on Compliance with the Chemical Weapons Convention (CWC). Report. Bureau of Arms Control. April 4, 2024. URL: <https://www.state.gov/condition-10c-annual-report-on-compliance-with-the-chemical-weapons-convention-cwc/> [дата звернення 10.02.25].
5. Porter, J. G. Russian Chemical and Biological Weapons: Limiting the Effects of Russian CBW Programs on NATO Security Through 2035. Missouri State University. 2024. URL: <https://bearworks.missouristate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4986&context=theses> [дата звернення 12.02.25].
6. Rimpler-Schmid, A., Trapp, R., Leonard, S., Kaunert, C., Dubucq, Y., Lefebvre, C., Mohn, H. EU preparedness and responses to Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) threats. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/653645/EXPO_STU\(2021\)65364_5_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/653645/EXPO_STU(2021)65364_5_EN.pdf) [дата звернення 15.12.24].
7. Tin, D., Cheng, L., Shin, H., Hata, R., Granholm, F., Braitberg, G. A Descriptive Analysis of the Use of Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Weapons by Violent Non-State Actors and the Modern-Day Environment of Threat. *Prehosp Disaster Med.* 2023.38(3). P.395–400. <https://doi.org/10.1017/S1049023X23000481>.
8. Bjerkeseth L. Vitenskapelige og teknologiske fremskrittets innvirkning pi CBRN-vern frem mot 2030 - konklusjoner fra en langtidsstudie i regi av NATO Science & Technology Organization. FFI-RAPPORT 22/002472. URL: <https://www.ffi.no/en/publications-archive/vitenskapelige-og-teknologiske-fremskrittets-innvirkning-pa-cbrnvern-frem-mot-2030konklusjoner-fra-en-langtidsstudie-i-regi-av-nato-science-technology-organization>. [дата звернення 19.12.24].
9. Reding, D.F., Eaton, J. Science & Technology Trends 2020-2040. NATO Science & Technology Organization. Brussels, Belgium. 2020. URL: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2020/4/pdf/190422ST_Tech_Trends_Report_2020-2040.pdf [дата звернення 09.01.25].
10. Гасанов, А., Тахіров, Р., & Іскандаров, Х. (2024). Майбутнє війни. Передбачувані зміни у військових трендах. *Social Development and Security*, 14(5), 1-18. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.5.1>.
11. Gichki, A. A. The Evolution of Nuclear Weapons: From Battlefield Tools to Political Instruments. *Modern Diplomacy*. 2024. URL: <https://moderndiplomacy.eu/2024/07/20/the-evolution-of-nuclear-weapons-from-battlefield-tools-to-political-instruments/> [дата звернення 14.01.25].
12. Park, S. How Have Nuclear Weapons Evolved Since Oppenheimer and the Trinity Test? 2023. URL: <https://blog.ucs.org/sulgiye-park/how-have-nuclear-weapons-evolved-since-oppenheimer-and-the-trinity-test/> [дата звернення 14.01.25].
13. Дядченко В., Петрухін Ю., Новіков О. Бойові токсичні хімічні речовини. Підручник у 3 т. Т. 1. Хімічна зброя. Х.: ФОП Бровін О.В., 2018. С.532. ISBN 978-617-7555-31-4.
14. Ніколаєнко Н. Біологічна зброя як зброя терору сучасного світу. Філософський альманах. 2018. Випуск 3–4 (165–166) С. 67-75. <https://doi.org/10.35423/2078-8142.2018.3-4.06>.
15. Benolli, F., Guidotti, M., Bisogni, F. The CBRN Threat. Perspective of an Interagency Response. *Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*. URL: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-42523-4> [дата звернення 13.12.24].
16. Bhatia, R. T. AI CBRN Risks: Governance Lessons from the Most Dangerous Misuses of AI. 2024. URL: <https://www.credo.ai/blog/ai-cbrn-risks-governance-lessons-from-the-most-dangerous-misuses-of-ai> [дата звернення 13.12.24].
17. Patrick F. Walsh. Evolving chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) terrorism. *Intelligence community response and ethical challenges National Security Intelligence and Ethics* P.261-279.

- <https://doi.org/10.4324/9781003164197-23> [дата звернення 13.12.24].
18. Nintanavongsa, P., Pitimon, I. On the Threat of Unmanned Aerial Vehicle as Weapon of Mass Destruction. *Information Technology Journal*. Vol. 16, No. 2. 2020. 1-9 с.
19. Abaimov, S., Martellini, M. Selected Issues of Cyber Security Practices in CBRNeCy Critical Infrastructure. *Cyber and Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, Explosives Challenges. Threats and Counter Efforts. Terrorism, Security, and Computation*. Switzerland. 2017. С.11-35. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62108-1>.
20. Schmidt, R., Schmidt, J. Chemical, biological, radiological and nuclear threats: the herculean challenge of modern toxikons. *Journal of High Threat & Austere Medicine*. 2024. 6(1):1-3. Australia. <https://doi.org/10.33235/JHTAM.6.1.1-3> [дата звернення 17.12.24].
21. Kaszeta, D. Horizon scanning the future of CBRN threats. 7. October 2024 URL: <https://euro-sd.com/2024/10/articles/40656/horizon-scanning-the-future-of-cbrn-threats/> [дата звернення 24.02.25].
22. Cetina i. Impact of the New Technologies on CBRN Terrorist Threats: General Perspective and Perspective of Republic of Croatia. *Vojenske rozhledy*. 2022. №4. P.119-134. <https://doi.org/10.3849/2336-2995.31.2022.04.119-139>.
23. Поплавець, С., Гузченко, С., Воробйов, О., Авраменко, О., & Шумейко, В. (2022). Можливий підхід щодо визначення раціонального складу сил та засобів радіаційного, хімічного, біологічного захисту для виконання заходів в умовах радіоактивного та хімічного зараження. *Social Development and Security*, 12(5), 130-146. <https://doi.org/10.33445/sds.2022.12.5.12>
24. Про забезпечення хімічної безпеки та управління хімічною продукцією: Закон України. Відомості Верховної Ради. 2023. № 55. ст.161.
25. Устінова Л., Сагло В., Баркевич В., Курділь Н., Євтодьєв О., Каплюк О. Актуальні питання медичного захисту військовослужбовців Збройних сил України від бойових отруйних речовин. *Медицина невідкладних станів*. No 8 (103), 2019. Київ. С. 72-80. <https://doi.org/10.22141/2224-0586.8.103.2019.192375>.

References

1. Nikolay I. Padarev. Chemical, biological, radiological and nuclear threats in the hybrid war context. *International scientific journal "Science, business, society"*. WEB ISSN 2534-8485. 2019. Republic of Bulgaria. P.118-119.
2. NATO's Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Defence. NATO 2022. Available from : https://www.nato.int/cps/fr/natohq/official_texts_197768.htm?selectedLocale=e [дата звернення 19.02.25].
3. Su, F., Anthony, I. Reassessing CBRN. Threats in a Changing Global Environment. Stockholm international peace research institute. June 2019. Available from : <https://www.jstor.org/stable/resrep24499> [дата звернення 26.02.25].
4. Condition (10)(C) Annual Report on Compliance with the Chemical Weapons Convention (CWC). Report. Bureau of Arms Control. April 4, 2024. Available from : <https://www.state.gov/condition-10c-annual-report-on-compliance-with-the-chemical-weapons-convention-cwc/> [дата звернення 10.02.25].
5. Porter, J. G. Russian Chemical and Biological Weapons: Limiting the Effects of Russian CBW Programs on NATO Security Through 2035. Missouri State University. 2024. Available from : <https://bearworks.missouristate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4986&context=theses> [дата звернення 12.02.25].
6. Rimpler-Schmid, A., Trapp, R., Leonard, S., Kaunert, C., Dubucq, Y., Lefebvre, C., Mohn, H. EU preparedness and responses to Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) threats. Available from :

- [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/653645/EXPO_STU\(2021\)653645_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/653645/EXPO_STU(2021)653645_EN.pdf) [дата звернення 15.12.24].
7. Tin, D., Cheng, L., Shin, H., Hata, R., Granholm, F., Braitberg, G. A Descriptive Analysis of the Use of Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Weapons by Violent Non-State Actors and the Modern-Day Environment of Threat. *Prehosp Disaster Med.* 2023.38(3). P.395–400. <https://doi.org/10.1017/S1049023X23000481>.
8. Bjerkeseth L. Vitenskapelige og teknologiske fremskrittets innvirkning pi CBRN-vern frem mot 2030 – konklusjoner fra en langtidsstudie i regi av NATO Science & Technology Organization. FFI-RAPPORT 22/002472. Available from : <https://www.ffi.no/en/publications-archive/vitenskapelige-og-teknologiske-fremskrittets-innvirkning-pa-cbrnvern-frem-mot-2030konklusjoner-fra-en-langtidsstudie-i-regi-av-nato-science-technology-organization>. [дата звернення 19.12.24].
9. Reding, D.F., Eaton, J. Science & Technology Trends 2020-2040. NATO Science & Technology Organization. Brussels, Belgium. 2020. Available from : https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2020/4/pdf/190422ST_Tech_Trends_Report_2020-2040.pdf [дата звернення 09.01.25].
10. Hasanov, A., Tahirov, R., & Iskandarov, K. (2024). The future of warfare. Anticipated changes in military trends. *Social Development and Security*, 14(5), 1-18. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.5.1>
11. Gichki, A. A. The Evolution of Nuclear Weapons: From Battlefield Tools to Political Instruments. *Modern Diplomacy*. 2024. Available from : <https://moderndiplomacy.eu/2024/07/20/the-evolution-of-nuclear-weapons-from-battlefield-tools-to-political-instruments/> [дата звернення 14.01.25].
12. Park, S. How Have Nuclear Weapons Evolved Since Oppenheimer and the Trinity Test? 2023. Available from : <https://blog.ucs.org/sulgiye-park/how-have-nuclear-weapons-evolved-since-oppenheimer-and-the-trinity-test/> [дата звернення 14.01.25].
13. Dyadchenko, V., Petrukhin, Y., Novikov, O. Chemical warfare agents. Textbook in 3 volumes. Vol. 1: Chemical weapons. Kh. FOP Brovin O.V. 2018. С.532. ISBN 978-617-7555-31-4
14. Nikolaienko, N. (2018). Biological weapons as weapons of terror of the modern world. *Multiversum. Philosophical Almanac*, (3-4), 67-75. <https://doi.org/10.35423/2078-8142.2018.3-4.06>
15. Benolli, F., Guidotti, M., Bisogni, F. The CBRN Threat. Perspective of an Interagency Response. *Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*. Available from : <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-03Q-42523-4> [дата звернення 13.12.24].
16. Bhatia, R. T. AI CBRN Risks: Governance Lessons from the Most Dangerous Misuses of AI. 2024. Available from : <https://www.credo.ai/blog/ai-cbrn-risks-governance-lessons-from-the-most-dangerous-misuses-of-ai> [дата звернення 13.12.24].
17. Patrick F. Walsh. Evolving chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) terrorism. Intelligence community response and ethical challenges *National Security Intelligence and Ethics* P.261-279. <https://doi.org/10.4324/9781003164197-23> [дата звернення 13.12.24].
18. Nintanavongsa, P., Pitimon, I. On the Threat of Unmanned Aerial Vehicle as Weapon of Mass Destruction. *Information Technology Journal*. Vol. 16, No. 2. 2020. 1-9 с.
19. Abaimov, S., Martellini, M. Selected Issues of Cyber Security Practices in CBRNeCy Critical Infrastructure. *Cyber and Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, Explosives Challenges. Threats and Counter Efforts. Terrorism, Security, and Computation*. Switzerland. 2017. С.11-35. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62108-1>.
20. Schmidt, R., Schmidt, J. Chemical, biological, radiological and nuclear threats: the herculean challenge of modern toxikons. *Journal of High Threat & Austere Medicine*. 2024. 6(1):1-3. Australia. <https://doi.org/10.33235/JHTAM.6.1.1-3> [дата звернення 17.12.24].

21. Kaszeta, D. Horizon scanning the future of CBRN threats. 7. October 2024 Available from : <https://euro-sd.com/2024/10/articles/40656/horizon-scanning-the-future-of-cbrn-threats/> [дата звернення 24.02.25].
22. Cetina i. Impact of the New Technologies on CBRN Terrorist Threats: General Perspective and Perspective of Republic of Croatia. *Vojenske rozhledy*. 2022. №4. P.119-134. <https://doi.org/10.3849/2336-2995.31.2022.04.119-139>.
23. Poplavetz, S., Huzchenko, S., Vorobiov, O., Avramenko, O., & Shumeiko, V. (2022). A possible approach to determining the rational composition of forces and means of radiation, chemical, biological protection for performing measures in conditions of radioactive and chemical contamination. *Social Development and Security*, 12(5), 130-146. <https://doi.org/10.33445/sds.2022.12.5.12>
24. “Law of Ukraine ‘On Ensuring Chemical Safety and Management of Chemical Products’”. Bulletin of the Verkhovna Rada. 2023. No. 55. p. 161.
25. Ustinova, L., Saglo, V., Barkevich, V., Kurdil, N., Yevtodiev, A., & Kaplyuk, O. (2019). Current problems of the health protection of Ukrainian Armed Forces servicemen from military toxic agents. *EMERGENCY MEDICINE*, (8.103), 72–80. <https://doi.org/10.22141/2224-0586.8.103.2019.192375>