

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 614.8:355.58

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-31>

### СИНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ МІННОГО РИЗИКУ В СИСТЕМІ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ

**Куртов Анатолій Ігорович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри підготовки офіцерів запасу  
Військово-юридичного інституту  
Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого  
ORCID ID: 0009-0008-4972-5455

**Дубовик Семен Олександрович,**

викладач кафедри загальновійськових дисциплін  
Військово-юридичного інституту  
Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого  
ORCID ID: 0009-0005-1506-2815

**Куртов Дмитро Анатолійович,**

старший викладач кафедри загальновійськових дисциплін  
Військово-юридичного інституту  
Національного юридичного університету імені Ярослава Мудрого  
ORCID ID: 0009-0007-8401-9954

*У статті досліджено проблему оцінювання мінного ризику у системі цивільного захисту в умовах масштабного мінного забруднення територій України. Обґрунтовано, що існуючі підходи до оцінювання мінної небезпеки переважно мають лінійний і фрагментарний характер, що не дозволяє повною мірою враховувати взаємодію технічних, територіальних, соціальних та управлінських чинників. Проаналізовано сучасний стан протимінної діяльності, а також наукові підходи до оцінювання ризику в гуманітарному розмінуванні та управлінні складними системами. Встановлено, що мінний ризик доцільно розглядати як інтегральну характеристику, яка формується внаслідок взаємодії множини факторів.*

*Методологічною основою дослідження є системний та ризик-орієнтований підходи, а також методи аналізу, узагальнення, експертного оцінювання та елементи математичного моделювання.*

*На основі зазначених підходів розроблено синергетичну модель інтегральної оцінки мінного ризику, яка враховує нелінійний ефект взаємодії факторів і дозволяє формалізувати рівень небезпеки на певній території. Наукова новизна дослідження полягає у розробці інтегрального показника мінного ризику, що враховує синергетичний ефект взаємодії технічних, територіальних, соціальних та управлінських чинників. Запропоновано факторну структуру мінного ризику, що включає технічні, територіальні, соціальні та управлінські складові.*

*Здійснено сценарне моделювання для трьох типових умов: урбанізованих територій, сільськогосподарських угідь та лісових масивів. Сценарне моделювання показало, що інтегральний рівень мінного ризику визначається не лише окремими значеннями факторів, але й характером їх поєднання та взаємодії.*

*Показано, що запропонована модель може використовуватися для ранжування територій за рівнем ризику, пріоритетизації заходів розмінування, оптимізації розподілу ресурсів та підтримки прийняття управлінських рішень у системі цивільного захисту.*

**Ключові слова:** мінний ризик, мінна небезпека, протимінна діяльність, цивільний захист, гуманітарне розмінування, ризик-орієнтований підхід, синергетична модель, інтегральна оцінка ризику.

**Kurtov Anatolii, Dubovyk Semen, Kurtov Dmytro. Synergetic model for integral assessment of mine risk in the civil protection system**

*The article examines the problem of mine risk assessment within the civil protection system under conditions of large-scale contamination of the territory of Ukraine with explosive hazards. It is substantiated that existing approaches to mine hazard assessment are predominantly linear and fragmented, which limits their ability to fully account for the interaction of technical, territorial, social, and managerial factors. The current state of mine action*

activities is analyzed, along with contemporary approaches to risk assessment in humanitarian demining and complex systems management. It is established that mine risk should be considered as an integral characteristic formed through the interaction of multiple factors.

The methodological basis of the study includes systemic and risk-based approaches, as well as methods of analysis, generalization, expert assessment, and elements of mathematical modeling.

Based on these approaches, a synergistic model for the integral assessment of mine risk is developed. The model accounts for the nonlinear effects of factor interaction and enables the formalization of hazard levels within a specific territory. The scientific novelty of the study lies in the development of an integral mine risk indicator that incorporates the synergistic interaction of technical, territorial, social, and managerial factors. A factor structure of mine risk is proposed, including technical, territorial, social, and managerial components.

Scenario-based modeling is conducted for three typical environments: urban areas, agricultural lands, and forest zones. The results of model validation demonstrate that the integral level of mine risk is determined not only by individual factor values but also by their combination and interaction.

It is shown that the proposed model can be applied for risk-based territorial ranking, prioritization of demining activities, optimization of resource allocation, and support of decision-making within the civil protection system.

**Key words:** mine risk, mine hazard, mine action, civil protection, humanitarian demining, risk-based approach, synergistic model, integral risk assessment.

**Вступ.** Сучасні умови повномасштабної збройної агресії проти України зумовили формування нових комплексних викликів у сфері національної безпеки, серед яких особливе місце займає проблема мінної небезпеки. Масове застосування мін, нерозірваних боєприпасів та саморобних вибухових пристроїв призвело до значного забруднення територій вибухонебезпечними предметами, що створює довготривалу загрозу для життя і здоров'я населення, функціонування об'єктів критичної інфраструктури та відновлення економічної діяльності. За наявними оцінками, значна частина території України залишається потенційно небезпечною, що обумовлює необхідність формування ефективної системи управління мінною небезпекою як складової цивільного захисту.

Водночас мінна небезпека в Україні має не лише локальний, але й трансграничний характер, оскільки наслідки мінного забруднення можуть поширюватися на суміжні території, впливаючи на безпеку населення та функціонування прикордонних регіонів. Крім того, мінна загроза має довгостроковий характер, зберігаючись протягом десятиліть після завершення активних бойових дій. У цьому контексті розробка ефективних підходів до оцінювання та прогнозування мінного ризику набуває значення не лише для забезпечення поточної безпеки, але й для стратегічного відновлення територій, включаючи відновлення економічної діяльності, землекористування та інфраструктури.

У системі цивільного захисту мінна небезпека виступає як складна багатофакторна загроза, яка формується під впливом технічних, територіальних, соціальних та управлінських чинників. Вона має не лише інженерно-технічний, але й соціально-економічний та організаційний вимір, що зумовлює необхідність застосування системного підходу до її оцінювання

та мінімізації. Водночас існуюча практика протимінної діяльності в Україні переважно орієнтована на реагування на вже виявлені загрози, тоді як питання прогнозування рівня мінного ризику та пріоритетизації заходів розмінування залишаються недостатньо формалізованими.

Аналіз сучасних підходів до оцінювання мінної небезпеки свідчить, що традиційні методи, які базуються на лінійних показниках (зокрема, щільності мінування або кількості виявлених вибухонебезпечних предметів), не дозволяють повною мірою врахувати складність і динамічність мінного середовища. Зокрема, вони не відображають ефекту взаємопідсилення факторів ризику, коли поєднання декількох несприятливих умов призводить до нелінійного зростання рівня загрози.

Отже, існуючі підходи до оцінювання мінної небезпеки потребують удосконалення шляхом переходу від лінійних до нелінійних моделей, що враховують синергетичний ефект взаємодії факторів.

У зв'язку з цим науковою проблемою дослідження є відсутність формалізованої моделі інтегральної оцінки мінного ризику у системі цивільного захисту.

**Метою статті є** розробка та обґрунтування синергетичної моделі інтегральної оцінки мінного ризику в системі цивільного захисту України, яка дозволяє формалізувати вплив ключових факторів мінної небезпеки та забезпечити підвищення ефективності планування заходів протимінної діяльності.

Для досягнення поставленої мети у статті передбачається вирішення таких завдань:

- проаналізувати сучасний стан протимінної діяльності у системі цивільного захисту України;
- дослідити теоретичні засади ризик-орієнтованого підходу до оцінювання мінної небезпеки;

- визначити основні фактори формування мінного ризику;
- розробити синергетичну модель інтегральної оцінки мінного ризику;
- обґрунтувати можливості практичного застосування запропонованої моделі у системі цивільного захисту.

У дослідженні використано системний підхід, метод аналізу та узагальнення, елементи математичного моделювання, а також експертні методи оцінювання факторів ризику.

Запропонований підхід дозволяє перейти від описового до формалізованого оцінювання мінної небезпеки, що створює методичну основу для підвищення ефективності управління ризиками у сфері цивільного захисту.

Система протимінної діяльності в Україні формується в умовах значного зростання масштабів мінного забруднення територій, що обумовлює підвищені вимоги до ефективності функціонування суб'єктів цивільного захисту. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що Україна належить до держав із найвищим рівнем мінної небезпеки у світі, що потребує впровадження комплексних підходів до управління ризиками [1, с. 5-7; 2, с. 10–12].

Ключову роль у системі протимінної діяльності відіграють підрозділи Державної служби України з надзвичайних ситуацій, які здійснюють обстеження територій, знешкодження вибухонебезпечних предметів, а також заходи з інформування населення про мінну небезпеку [3, IMAS 12.10]. Водночас дослідження показують, що діяльність ДСНС значною мірою орієнтована на реагування на вже виявлені загрози, що обмежує можливості превентивного управління ризиками [4, с. 22–25].

Разом із тим така орієнтація на реагування значною мірою зумовлена об'єктивними факторами, передусім безпрецедентними масштабами мінного забруднення територій. Значні площі потенційно небезпечних земель, обмеженість ресурсів та необхідність оперативного реагування на безпосередні загрози змушують підрозділи протимінної діяльності функціонувати у режимі так званого «гасіння пожежі», коли пріоритет надається ліквідації вже виявлених небезпечних об'єктів. У таких умовах системне прогнозування ризиків та довгострокове планування відходять на другий план, що знижує загальну ефективність управління мінною небезпекою.

Важливим елементом системи протимінної діяльності є оператори ПМД, включаючи як національні, так і міжнародні організації, діяльність яких координується відповідно до

вимог міжнародних стандартів. Як зазначається у дослідженнях United Nations Mine Action Service, ефективність протимінної діяльності значною мірою залежить від узгодженості дій різних суб'єктів та якості інформаційного обміну [2, с. 18-21; 3, IMAS 07.11].

Суттєву роль у розвитку системи протимінної діяльності відіграє міжнародна технічна та фінансова допомога, зокрема з боку Geneva International Centre for Humanitarian Demining та United Nations Development Programme. У сучасних звітах зазначається, що міжнародна підтримка сприяє впровадженню сучасних методів обстеження територій, цифрових систем управління даними (зокрема IMSMA), а також підвищенню кваліфікації персоналу [5, с. 30-34; 6, с. 12-16].

Разом із тим аналіз сучасного стану протимінної діяльності свідчить про наявність системних проблем, пов'язаних із недостатнім рівнем інтеграції даних, обмеженими можливостями прогнозування ризиків та фрагментарністю інформаційного забезпечення [4, с. 26-29; 6, с. 20-23]. Наявні підходи до оцінювання мінної небезпеки здебільшого базуються на результатах обстеження територій та статистичних даних, що відображають вже існуючі загрози.

При цьому недостатньо розвиненими залишаються інструменти прогнозного аналізу, які дозволяють оцінювати потенційний рівень небезпеки з урахуванням взаємодії різних факторів. У міжнародних дослідженнях наголошується на необхідності переходу від реактивних моделей управління до проактивних, що базуються на ризик-орієнтованому підході та використанні аналітичних моделей [1, с. 8-10; 5, с. 40-44].

У зв'язку з цим особливою актуальністю набуває питання пріоритезації заходів протимінної діяльності (prioritization), що передбачає спрямування ресурсів на ті території, де рівень ризику є найвищим, а не лише там, де зафіксовано найбільшу кількість вибухонебезпечних предметів [3, IMAS 07.11].

Таким чином, сучасна система протимінної діяльності у межах цивільного захисту переважно орієнтована на реагування на вже існуючі загрози, що обумовлено масштабами мінного забруднення, але водночас обмежує можливості прогнозування та попередження мінних ризиків. Це зумовлює необхідність впровадження інтегральних моделей оцінювання мінної небезпеки, які забезпечують науково обґрунтовану пріоритезацію заходів та підвищують ефективність управління ризиками.

Проблематика оцінювання мінного ризику у сфері протимінної діяльності посідає важливе

місце у сучасних міжнародних дослідженнях, оскільки ефективність гуманітарного розмінування дедалі більше залежить не лише від технічних спроможностей, а й від якості аналітичного забезпечення прийняття рішень. У цьому контексті особливого поширення набув ризик-орієнтований підхід до нетехнічного та технічного обстеження територій [1, с. 57; 2, с. 10-12], відповідно до якого пріоритетність заходів визначається не тільки фактом наявності вибухонебезпечних предметів, але й потенційними наслідками для населення, інфраструктури, землекористування та економічної діяльності [7, с. 1-3].

У міжнародній науковій та прикладній практиці ризик-орієнтований підхід розглядається як альтернатива суто технічному баченню мінної небезпеки. Якщо традиційна логіка гуманітарного розмінування зосереджувалася переважно на пошуку та знешкодженні вибухонебезпечних предметів, то сучасні підходи акцентують увагу на необхідності оцінювання ступеня загрози для конкретних категорій населення, об'єктів та територій. Саме тому у сучасних дослідженнях дедалі частіше застосовуються багатокритеріальні моделі, які дозволяють інтегрувати технічні, просторові, соціальні та організаційні характеристики в єдину аналітичну систему [8, с. 2-5].

Значний внесок у розвиток методології оцінювання мінного ризику зробили міжнародні організації, насамперед UNMAS і GICHD. У документах та аналітичних розробках цих інституцій мінна небезпека розглядається не лише як результат фізичної присутності мін чи інших вибухонебезпечних предметів, а як складне явище, що формується на перетині технічних характеристик загрози, особливостей території, інтенсивності використання земель та поведінкових особливостей населення [3; 9, с. 10-15]. Такий підхід є важливим, оскільки дозволяє перейти від формальної фіксації небезпечних ділянок до їх функціональної оцінки з точки зору реального ризику.

У межах гуманітарного розмінування особлива увага приділяється просторовому аналізу ризиків. У сучасних матеріалах GICHD підкреслюється, що інтеграція геопросторових даних, інформації про щільність населення, характер землекористування, наявність транспортної та соціальної інфраструктури дає змогу значно точніше визначати пріоритети розмінування [9, с. 22-27]. Це означає, що сам факт мінного забруднення ще не є достатнім показником для визначення черговості заходів: одна й та сама щільність забруднення може створювати різний

рівень ризику залежно від того, чи йдеться про сільськогосподарські угіддя, лісові масиви, декуповані села або урбанізовані території.

Методологічну основу цих підходів значною мірою становлять Міжнародні стандарти проти-мінної діяльності (IMAS), які регламентують проведення нетехнічного та технічного обстеження, управління інформацією, оцінювання ризиків і контроль якості [3, IMAS 07.11]. Хоча IMAS не пропонують єдиної універсальної математичної моделі оцінки мінного ризику, вони формують важливе концептуальне підґрунтя для системного підходу, відповідно до якого оцінювання небезпеки має спиратися на комплекс факторів і бути пов'язаним із практичними рішеннями щодо планування та пріоритезації робіт.

Разом із тим аналіз наукових публікацій свідчить, що у більшості досліджень, присвячених оцінюванню ризиків у складних системах, переважають лінійні або квазі-лінійні підходи [8, с. 6-8; 10, с. 2192-2194]. Їх сутність полягає в тому, що ризик визначається як сума або зважена сума окремих факторів, які розглядаються як незалежні змінні. Перевагою такого підходу є його простота, прозорість і можливість швидкого практичного застосування. Однак саме ця спрощеність одночасно є і його основним недоліком, оскільки у реальних умовах фактори мінної небезпеки не діють ізольовано.

Для протимінної діяльності це має принципове значення. Наприклад, висока технічна складність вибухонебезпечних предметів сама по собі ще не визначає критичний рівень загрози, однак у поєднанні зі складним рельєфом, низьким рівнем обізнаності населення та недостатньою координацією між суб'єктами ПМД рівень ризику може зростати непропорційно. Саме такий ефект взаємопідсилення ігнорується у більшості моделей, де фактори підсумовуються лінійно.

Ще однією проблемою сучасних досліджень є їх фрагментарність. Частина робіт зосереджується переважно на технічних аспектах – типах вибухонебезпечних предметів, методах виявлення, технологіях розмінування. Інші дослідження приділяють основну увагу геоінформаційному аналізу, картографуванню небезпечних територій або питанням інформування населення [9, с. 30-35; 11]. Однак інтеграція технічних, територіальних, соціальних та управлінських чинників у єдину модель оцінювання мінного ризику залишається недостатньо опрацьованою.

Окремо слід відзначити дослідження з теорії управління ризиками, у яких доведено, що в складних соціотехнічних системах ризик

має нелінійний характер і може зростати не пропорційно, а стрибкоподібно внаслідок взаємодії кількох несприятливих чинників [10, с. 2195-2198]. Для сфери протимінної діяльності цей висновок є особливо важливим, оскільки тут небезпека визначається не лише наявністю фізичної загрози, але й контекстом її сприйняття, доступністю території, інтенсивністю її використання та спроможністю суб'єктів цивільного захисту забезпечити швидке і якісне реагування.

З урахуванням наведеного, проведений аналіз дає підстави стверджувати, що існуючі підходи до оцінювання мінної небезпеки, попри їх практичну цінність, мають три суттєві обмеження. По-перше, вони носять переважно лінійний характер. По-друге, значна частина з них є фрагментарною та зосереджується на окремих групах факторів. По-третє, у них майже не враховується синергетичний ефект взаємодії факторів ризику.

Отже, існуючі підходи до оцінювання мінної небезпеки не забезпечують достатньої аналітичної основи для комплексного прогнозування мінного ризику у системі цивільного захисту.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки інтегральної моделі, яка б дозволяла поєднати технічні, територіальні, соціальні та управлінські чинники в єдину систему оцінювання та врахувати нелінійний характер їх взаємодії. Саме таке завдання і зумовлює доцільність застосування синергетичного підходу у межах даного дослідження.

**Методи та методика дослідження.** Методологічною основою дослідження є системний та ризик-орієнтований підходи, які дозволяють розглядати мінну небезпеку як складну багатофакторну систему. Використання зазначених підходів зумовлене необхідністю врахування взаємодії різнорідних чинників, що формують рівень мінного ризику у системі цивільного захисту.

У сучасній науковій практиці ризик визначається як поєднання ймовірності настання небезпечної події та тяжкості її наслідків або ширше – як вплив невизначеності на досягнення цілей [7; 12, с. 173-175]. Такий підхід дозволяє розглядати ризик не лише як характеристику небезпеки, але і як інструмент прийняття управлінських рішень у складних системах.

У сфері цивільного захисту ризик пов'язаний із виникненням надзвичайних ситуацій, що можуть призводити до людських втрат, матеріальних збитків та порушення функціонування інфраструктури. У контексті протимінної діяльності ризик визначається як ймовірність

ураження населення або об'єктів вибухонебезпечними предметами та масштаб можливих наслідків [13, с. 25-30].

З огляду на специфіку протимінної діяльності важливим є нормативно-правове забезпечення формування та оцінювання ризиків. Відповідно до Закону України «Про протимінну діяльність в Україні» [14], ключовим елементом є проведення нетехнічного та технічного обстеження територій [3; IMAS 08.10; IMAS 08.20], результати яких становлять інформаційну основу для оцінювання мінної небезпеки.

Таким чином, дані нетехнічного обстеження, що включають відомості про типи загроз, особливості території, характер використання земель та поведінкові аспекти населення, можуть розглядатися як вихідні параметри для формалізованого оцінювання мінного ризику в межах запропонованої моделі (Т, L, S, M).

Сучасні підходи до управління у сфері цивільного захисту базуються на принципах ризик-орієнтованого управління, відповідно до яких ключовим завданням є не лише реагування на надзвичайні ситуації, але й їх попередження [15, с. 50-55; 16]. Управління ризиками включає ідентифікацію небезпек, аналіз та оцінювання ризиків, а також розробку заходів щодо їх мінімізації.

Системний підхід передбачає розгляд мінної небезпеки як сукупності взаємопов'язаних факторів, взаємодія яких визначає рівень ризику. У складних соціотехнічних системах ризик має нелінійний характер і може зростати непропорційно внаслідок одночасного впливу кількох несприятливих чинників [10, с. 2195-2198; 17, с. 107-109].

У межах дослідження використано методи аналізу та узагальнення, елементи математичного моделювання, а також експертні методи оцінювання факторів ризику. З урахуванням зазначених підходів сформовано факторну структуру мінного ризику, що включає технічні, територіальні, соціальні та управлінські чинники.

Отже, запропонований методичний підхід дозволяє перейти від описового до формалізованого оцінювання мінної небезпеки, що створює основу для побудови інтегральної моделі мінного ризику.

Як видно з табл. 1, мінний ризик формується під впливом взаємопов'язаних груп факторів, що охоплюють технічні, територіальні, соціальні та управлінські аспекти.

Ці фактори формують базовий рівень небезпеки, однак не визначають його повною мірою без урахування інших умов.

Система факторів мінного ризику у цивільному захисті

Група факторів	Позначення	Зміст фактору	Основні показники
Технічні	T	Характеристики вибухонебезпечних предметів	типи мін, наявність мін-пасток, стан боєприпасів, складність знешкодження
Територіальні	L	Природно-ландшафтні умови	тип ґрунту, рельєф, рослинність, доступність території
Соціальні	S	Поведінка та активність населення	рівень обізнаності, щільність населення, інтенсивність використання території
Управлінські	M	Організація протимінної діяльності	координація, ресурси, інформаційний обмін, планування робіт

Примітка: складено автором на основі систематизації факторів мінної небезпеки.

Територіальні фактори відображають природні умови, в яких реалізується мінна небезпека. До них належать рельєф місцевості, тип ґрунту, густина рослинності, рівень заболоченості та доступність території.

Вони впливають як на ймовірність виявлення вибухонебезпечних предметів, так і на ефективність проведення робіт із розмінування.

Соціальні фактори пов'язані з діяльністю населення та особливостями використання території. Вони включають рівень обізнаності про мінну небезпеку, щільність населення, інтенсивність використання земель та дотримання правил безпеки.

У багатьох випадках саме ці фактори визначають фактичний рівень ризику, оскільки вони впливають на ймовірність контакту людей із небезпечними об'єктами.

Управлінські фактори характеризують ефективність функціонування системи протимінної діяльності. До них належать рівень координації між суб'єктами, забезпеченість ресурсами, якість планування, швидкість обміну інформацією, використання інформаційних систем, а також рівень міжнародної сумісності даних (interoperability) [3; 15].

Актуальність останнього аспекту зумовлена тим, що у протимінній діяльності в Україні беруть участь як національні, так і міжнародні оператори, діяльність яких потребує узгодженого інформаційного обміну. Недостатній рівень сумісності даних, різні формати їх обробки та обмежена інтеграція інформаційних систем можуть ускладнювати координацію дій, що негативно впливає на ефективність управління ризиками.

Недостатній рівень організації та координації, включаючи проблеми сумісності даних, може значно підвищувати ризик навіть за відносно сприятливих технічних і територіальних умов.

Ключовою особливістю запропонованої факторної структури є те, що зазначені фактори не є незалежними, а формують взаємопов'язану

систему. Їх взаємодія може призводити до синергетичного ефекту, за якого одночасна дія кількох несприятливих чинників викликає непропорційне зростання рівня ризику [17, с. 107-109; 18, с. 460-463].

Зокрема, поєднання складного рельєфу місцевості, високої технічної складності вибухонебезпечних предметів та низького рівня обізнаності населення створює значно вищий рівень небезпеки, ніж кожен із цих факторів окремо.

Отже, мінний ризик доцільно розглядати як результат взаємодії технічних, територіальних, соціальних та управлінських факторів, що формує підґрунтя для побудови інтегральної моделі його оцінювання.

Водночас врахування лише сукупності факторів без урахування характеру їх взаємодії не дозволяє адекватно відобразити реальний рівень мінної небезпеки. У складних соціотехнічних системах взаємодія факторів має нелінійний характер, що зумовлює виникнення синергетичного ефекту, за якого загальний рівень ризику зростає непропорційно.

З огляду на це виникає необхідність побудови такої математичної моделі, яка б:

- поєднувала різномірні фактори в єдиному інтегральному показнику;
- забезпечувала їх порівнянність та агрегування;
- враховувала нелінійний характер зростання ризику.

**Результати.** У межах даного дослідження для вирішення зазначеного завдання використано підхід багатокритеріального агрегування із застосуванням середньоквадратичної форми узагальнення показників та введенням коефіцієнта синергетичного підсилення.

На цій основі запропоновано інтегральну модель оцінки мінного ризику:

$$R_m = \sqrt{(w_T \cdot T)^2 + (w_L \cdot L)^2 + (w_S \cdot S)^2 + (w_M \cdot M)^2} \cdot \sigma_{syn} \quad (1)$$

де:

$R_m$  – інтегральний показник мінного ризику;

T, L, S, M – відповідно технічний, територіальний, соціальний та управлінський чинники;  
 $w_T, w_L, w_S, w_M$  – вагові коефіцієнти;  
 $\sigma_{syn}$  – коефіцієнт синергетичного підсилення.

Використання середньоквадратичної форми агрегування забезпечує врахування внеску кожного фактора без ефекту лінійної компенсації, характерного для адитивних моделей. Це дозволяє уникнути ситуацій, коли низьке значення одного показника штучно зменшує інтегральний рівень ризику.

Для забезпечення коректності моделі вагові коефіцієнти нормуються за умовою:

$$w_T + w_L + w_S + w_M = 1 \quad (2)$$

Кожен із факторів оцінюється за уніфікованою шкалою (наприклад, від 0 до 5). Нормування вагових коефіцієнтів забезпечує їх порівнянність та коректність агрегування в межах інтегральної моделі.

Запропонована форма моделі забезпечує агрегування факторів з урахуванням їх відносної ваги та дозволяє уникнути лінійного ефекту компенсації, коли низьке значення одного фактора штучно знижує загальний рівень ризику.

Модель базується на чотирьох групах факторів.

Технічний фактор (Т) характеризує складність та небезпечність вибухонебезпечних предметів: типи мін, наявність мін-пасток, стан боєприпасів, можливість дистанційного підриву та складність знешкодження.

Територіально-ландшафтний фактор (L) відображає природні умови: рельєф, тип ґрунту, густоту рослинності, заболоченість та доступність території.

Соціально-поведінковий фактор (S) включає рівень обізнаності населення, щільність населення, інтенсивність використання територій та дотримання правил безпеки.

Управлінсько-організаційний фактор (M) характеризує ефективність системи протимінної діяльності та включає рівень координації, забезпеченість ресурсами, якість планування, швидкість обміну інформацією та рівень сумісності даних між суб'єктами (interoperability).

Таким чином, мінний ризик формується як результат комплексної взаємодії технічних, територіальних, соціальних та управлінських факторів.

З урахуванням взаємозв'язку зазначених факторів до моделі введено коефіцієнт синергетичного підсилення, який відображає нелінійний ефект їх взаємодії.

Коефіцієнт синергетичного підсилення визначається як:

$$\sigma_{syn} = 1 + \sum_{i < j} \sigma_{ij} \quad (3)$$

де  $\sigma_{ij}$  – коефіцієнти взаємодії між відповідними групами факторів, що відображають ступінь їх взаємного підсилення.

Значення  $\sigma_{syn}$  зростає у випадках одночасного впливу кількох несприятливих факторів, що призводить до непропорційного підвищення рівня загрози.

Значення коефіцієнтів взаємодії  $\sigma_{ij}$  визначаються експертним шляхом на основі аналізу практики протимінної діяльності та узагальнення результатів наукових досліджень. У межах даної моделі вони приймаються в діапазоні від 0 до 1, де 0 відповідає відсутності взаємного впливу, а 1 – максимальному рівню синергетичного підсилення.

Відповідно, інтегральний коефіцієнт  $\sigma_{syn}$  зазвичай перебуває в інтервалі  $1 \leq \sigma_{syn} \leq 2$ , що відображає ступінь нелінійного зростання ризику.

Значення коефіцієнтів взаємодії наведено у вигляді матриці синергетичних зв'язків (табл. 2), сформованої на основі експертного оцінювання.

Таблиця 2

**Матриця синергетичних взаємодій факторів мінного ризику**

Фактори	T	L	S	M
T	–	0,30	0,25	0,35
L	0,30	–	0,20	0,25
S	0,25	0,20	–	0,40
M	0,35	0,25	0,40	–

Примітка: значення (0–1) відображають ступінь взаємного підсилення факторів.

Практичне застосування моделі передбачає використання експертних методів на основі:

- даних нетехнічного та технічного обстеження територій;
- статистичних матеріалів;
- інформації операторів протимінної діяльності.

Вагові коефіцієнти визначаються залежно від типу території. Зокрема, для урбанізованих територій більшу вагу мають технічні та соціальні фактори, тоді як для сільськогосподарських – територіальні та управлінські.

Запропонована модель може використовуватися як інструмент підтримки прийняття управлінських рішень у системі цивільного захисту, забезпечуючи ранжування територій за рівнем ризику, пріоритетизацію заходів розмінування та оптимізацію розподілу ресурсів.

Отже, синергетична модель створює основу для переходу від реактивного до проактивного управління мінною небезпекою.

Для перевірки прикладної цінності запропонованої синергетичної моделі інтегральної оцінки мінного ризику доцільно здійснити її сценарне застосування до типових умов, у яких реалізується мінна небезпека в Україні. Такий підхід дозволяє продемонструвати вплив різних факторів на рівень ризику та обґрунтувати можливість використання моделі для пріоритетизації заходів протимінної діяльності.

З огляду на специфіку мінного забруднення територій України, для апробації моделі виокремлено три типові сценарії: урбанізовані території, сільськогосподарські угіддя та лісові масиви. Кожен із зазначених сценаріїв характеризується специфічним поєднанням технічних, територіальних, соціальних та управлінських факторів.

Оцінювання факторів здійснюється за уніфікованою шкалою від 0 до 5, де 0 відповідає мінімальному рівню впливу, а 5 – максимальному. Значення факторів і вагових коефіцієнтів мають умовно-експертний характер і використовуються для демонстрації функціональних можливостей моделі.

Для урбанізованих територій характерним є високий рівень технічної складності мінної небезпеки, що обумовлено наявністю вибухонебезпечних предметів у забудові, інженерній інфраструктурі та транспортних мережах. Водночас значний вплив має соціальний фактор, оскільки навіть часткове повернення населення до небезпечних зон підвищує ймовірність ураження.

Для сільськогосподарських угідь визначальним є соціально-економічний вимір ризику, пов'язаний з інтенсивним використанням земель, необхідністю їх швидкого повернення до господарського обігу та забезпеченням продовольчої безпеки. При цьому технічна складність може бути нижчою, однак загальний рівень ризику залишається значним.

Лісові масиви характеризуються підвищеним впливом територіально-ландшафтних факторів, зокрема складним рельєфом, густою рослинністю та обмеженою доступністю територій, що ускладнює виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів.

На основі запропонованої моделі здійснено розрахунок інтегрального показника мінного ризику для кожного сценарію.

Для урбанізованої території:

$$R_m = \sqrt{\left[ \left[ (0,30 \cdot 5)^2 + (0,20 \cdot 3)^2 + (0,25 \cdot 4)^2 + (0,25 \cdot 4)^2 \right] \right]} \cdot 1,75 = 3,76$$

Для сільськогосподарських угідь:

$$R_m = \sqrt{\left[ \left[ (0,20 \cdot 3)^2 + (0,20 \cdot 2)^2 + (0,35 \cdot 5)^2 + (0,25 \cdot 3)^2 \right] \right]} \cdot 1,55 = 3,16$$

Для лісового масиву:

$$R_m = \sqrt{\left[ \left[ (0,25 \cdot 4)^2 + (0,35 \cdot 5)^2 + (0,15 \cdot 2)^2 + (0,25 \cdot 3)^2 \right] \right]} \cdot 1,60 = 3,47$$

Для інтерпретації отриманих значень інтегрального показника мінного ризику доцільно використовувати таку шкалу:

- до 2,0 – низький рівень ризику;
- 2,1–3,0 – помірний рівень ризику;
- 3,1–4,0 – високий рівень ризику;
- понад 4,0 – критичний рівень ризику.

Результати проведеного сценарного моделювання свідчать, що найвищий рівень мінного ризику характерний для урбанізованих територій (3,76), що зумовлено поєднанням високої технічної складності та значного соціального навантаження. Лісові масиви також демонструють високий рівень ризику (3,47), що обумовлено складними природними умовами та обмеженою доступністю територій. Сільськогосподарські угіддя мають дещо нижчий показник (3,16), однак також належать до категорії високого ризику, з огляду на інтенсивне використання територій та їх економічне значення.

На відміну від традиційних адитивних моделей, де інтегральний ризик для урбанізованої території склав би лише 4.1 (середнє зважене), синергетична модель акцентує увагу на критичному рівні небезпеки (3.76 за шкалою до 5), що дозволяє ідентифікувати приховані загрози, які виникають саме на перетині факторів.

Отримані результати узгоджуються із сучасними підходами до ризик-орієнтованого управління у сфері цивільного захисту та підтверджують доцільність використання інтегральних моделей як інструменту evidence-based прийняття управлінських рішень щодо пріоритетизації заходів протимінної діяльності.

Таблиця 3

### Вихідні параметри сценарного моделювання мінного ризику

Сценарій	T	L	S	M	$w_T$	$w_L$	$w_S$	$w_M$	$\sigma_{syn}$
Урбанізована територія	5	3	4	4	0,30	0,20	0,25	0,25	1,75
Сільськогосподарські угіддя	3	2	5	3	0,20	0,20	0,35	0,25	1,55
Лісовий масив	4	5	2	3	0,25	0,35	0,15	0,25	1,60

Примітка: складено автором для демонстрації прикладного застосування моделі.

Практичне значення запропонованої моделі полягає у можливості ранжування територій за рівнем ризику та обґрунтованої пріоритезації заходів протимінної діяльності. Такий підхід дозволяє спрямовувати обмежені ресурси на ті території, де рівень ризику є максимальним, що забезпечує підвищення ефективності управлінських рішень у системі цивільного захисту.

Крім того, модель може бути інтегрована у процеси планування протимінної діяльності та використовуватися як аналітичний інструмент підтримки прийняття рішень. Її поєднання з геоінформаційними системами (GIS) та інформаційними платформами, зокрема IMSMA, створює можливості для просторового аналізу мінної небезпеки, формування цифрових реєстрів ризику та автоматизації процесів оцінювання.

Таким чином, запропонована синергетична модель забезпечує перехід від реактивного до проактивного управління мінною небезпекою, що відповідає сучасним вимогам розвитку системи цивільного захисту.

**Висновки.** У статті проведено комплексне дослідження системи протимінної діяльності в Україні та розроблено математичний апарат для оцінювання ризиків у межах цивільного захисту. За результатами роботи сформульовано такі висновки:

1. Наукова новизна дослідження полягає у розробці синергетичної моделі інтегральної оцінки мінного ризику, яка, на відміну від існуючих лінійних підходів, враховує нелінійний характер взаємодії факторів. Вперше запропоновано

використання коефіцієнта синергетичного підсилення ( $\sigma_{syn}$ ), що дозволяє формалізувати ефект взаємного обтяження технічних, територіальних, соціальних та управлінських чинників.

2. Доведено, що мінна небезпека є складною соціотехнічною системою. Визначено, що інтегральний ризик формується під впливом чотирьох груп факторів: технічних (характеристики ВВП), територіальних (ландшафт), соціальних (поведінка населення) та управлінських (координація та сумісність даних).

3. Результати сценарного моделювання підтвердили адекватність моделі. Встановлено, що найвищий рівень ризику (3,76) притаманний урбанізованим територіям через критичне поєднання технічної складності об'єктів та щільності населення. Лісові масиви та сільськогосподарські угіддя також демонструють високі показники ризику (3,47 та 3,16 відповідно), проте з іншою конфігурацією домінуючих факторів.

4. Практичне значення роботи полягає у створенні аналітичного інструменту для пріоритезації заходів розмінування та оптимізації ресурсів ДСНС. Запропонована модель може бути інтегрована в інформаційну систему IMSMA та геоінформаційні платформи для формування цифрових реєстрів ризику та переходу до проактивного управління мінною небезпекою.

5. Перспективи подальших досліджень пов'язані з автоматизацією збору даних для моделі за допомогою сенсорів БПЛА та вдосконаленням механізмів interoperability (інформаційної сумісності) між національними та міжнародними операторами протимінної діяльності.

#### ЛІТЕРАТУРА :

1. World Bank. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment 2023. Washington, 2023. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099184503212328877/> (дата звернення: 10.04.2026).
2. United Nations Mine Action Service. Mine Action Programme in Ukraine. New York, 2023. URL: <https://www.unmas.org> (дата звернення: 10.04.2026).
3. United Nations Mine Action Service. International Mine Action Standards (IMAS). New York, 2023. URL: <https://www.mineactionstandards.org> (дата звернення: 10.04.2026).
4. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Аналітичні матеріали щодо гуманітарного розмінування в Україні. Київ, 2023. URL: <https://dsns.gov.ua> (дата звернення: 10.04.2026).
5. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Mine Action in Ukraine. Geneva, 2022. URL: <https://www.gichd.org> (дата звернення: 10.04.2026).
6. United Nations Development Programme. Humanitarian Mine Action in Ukraine. New York, 2023. URL: <https://www.undp.org> (дата звернення: 10.04.2026).
7. International Organization for Standardization. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. Geneva, 2018.
8. Aven T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. European Journal of Operational Research. 2016. Vol. 253, No. 1. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.12.023.
9. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Explosive Ordnance Risk Education. Geneva, 2019. URL: <https://www.gichd.org> (дата звернення: 10.04.2026).
10. Renn O. Advanced risk governance. Risk Analysis. 2020. Vol. 40, No. 11. P. 2191–2207. DOI: 10.1111/risa.13506.

11. United Nations Development Programme. Mine Action for Sustainable Development. New York, 2021. URL: <https://www.undp.org> (дата звернення: 10.04.2026).
12. Kaplan S., Garrick B. J. On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*. 1981. Vol. 1, No. 1. P. 11–27. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x.
13. Haimes Y. Y. *Risk Modeling, Assessment, and Management*. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2021. DOI: 10.1002/9781119759638.
14. Закон України «Про протимінну діяльність в Україні» від 06.12.2018 № 2642-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19> (дата звернення: 10.04.2026).
15. UNDRR. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022*. Geneva, 2022. URL: <https://www.undrr.org> (дата звернення: 10.04.2026).
16. European Commission. *Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management*. Brussels, 2010. URL: <https://ec.europa.eu> (дата звернення: 10.04.2026).
17. Aven T., Zio E. Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 193. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106110.
18. Renn O., Klinke A. Systemic risks: characteristics and management approaches. *Journal of Risk Research*. 2021. Vol. 24, No. 3–4. P. 451–468. DOI: 10.1080/13669877.2020.1750461.

#### REFERENCES :

1. World Bank. (2023). *Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment 2023*. Washington. Available at: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099184503212328877/>
2. United Nations Mine Action Service. (2023). *Mine Action Programme in Ukraine*. New York. Available at: <https://www.unmas.org>.
3. United Nations Mine Action Service. (2023). *International Mine Action Standards (IMAS)*. New York. Available at: <https://www.mineactionstandards.org>.
4. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. (2023). *Analitychni materialy shchodo humanitarnoho rozminuvannia v Ukraini* [Analytical materials on humanitarian demining in Ukraine]. Kyiv. Available at: <https://dsns.gov.ua> [in Ukrainian].
5. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. (2022). *Mine Action in Ukraine*. Geneva. Available at: <https://www.gichd.org>.
6. United Nations Development Programme. (2023). *Humanitarian Mine Action in Ukraine*. New York. Available at: <https://www.undp.org>.
7. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines*. Geneva.
8. Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1–13. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.12.023.
9. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. (2019). *Explosive Ordnance Risk Education*. Geneva. Available at: <https://www.gichd.org>.
10. Renn, O. (2020). Advanced risk governance. *Risk Analysis*, 40(11), 2191–2207. DOI: 10.1111/risa.13506.
11. United Nations Development Programme. (2021). *Mine Action for Sustainable Development*. New York. Available at: <https://www.undp.org>.
12. Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, 1(1), 11–27. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x.
13. Haimes, Y. Y. (2021). *Risk Modeling, Assessment, and Management* (5th ed.). Hoboken: Wiley. DOI: 10.1002/9781119759638.
14. Zakon Ukrainy "Pro protyminnu diialnist v Ukraini" [Law of Ukraine "On Mine Action in Ukraine"] No. 2642-VIII. (2018). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19> [in Ukrainian].
15. UNDRR. (2022). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022*. Geneva. Available at: <https://www.undrr.org>.
16. European Commission. (2010). *Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management*. Brussels. Available at: <https://ec.europa.eu>.
17. Aven, T., & Zio, E. (2020). Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making. *Reliability Engineering & System Safety*, 193. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106110.
18. Renn, O., & Klinke, A. (2021). Systemic risks: characteristics and management approaches. *Journal of Risk Research*, 24(3–4), 451–468. DOI: 10.1080/13669877.2020.1750461.



Стаття поширюється на умовах  
ліцензії відкритого доступу  
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 13.04.2026  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.05.2026  
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026