
ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПІДХОДИ У ГУМАНІТАРНОМУ РОЗМІНУВАННІ: АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПРАЦЬ І СУЧАСНИХ РІШЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ VOSVIEWER

Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Пацева І. Г.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-511-2-3>

ВСТУП

Відповідно Закону України від 06.12.2018 № 2642-VIII «Про протимінну діяльність в Україні»¹ розмінування (гуманітарне розмінування) – комплекс заходів, які проводяться операторами протимінної діяльності з метою ліквідації небезпек, пов'язаних із вибухонебезпечними предметами, включаючи нетехнічне та технічне обстеження територій, складення карт, виявлення, знешкодження та (або) знищення вибухонебезпечних предметів, маркування, підготовку документації після розмінування, надання громадам інформації щодо протимінної діяльності та передачу очищеної території. Проблемними питаннями гуманітарного розмінування щодо необхідності ефективного й безпечного виявлення та знешкодження мін і вибухонебезпечних предметів, які залишаються на територіях після збройних конфліктів, є: широке розповсюдження мін; низька ефективність традиційних методів розмінування; складність умов виявлення; потреба в інтеграції сучасних технологій; економічні, соціальні та екологічні наслідки.

Актуальність дослідження в сфері гуманітарного розмінування зумовлена необхідністю вирішення проблем безпеки, економічного відновлення та покращення умов життя в регіонах, що постраждали від вибухонебезпечних предметів. Основними аргументами, що підкреслюють актуальність обраної теми, є наступні: зростання масштабів мінної загрози; екологічні аспекти; економічні втрати та уповільнення розвитку; інноваційні технології та їх впровадження;

¹ Про протимінну діяльність в Україні: Закон України від 06.12.2018 № 2642-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19>.

проблема хибних тривог і ефективності виявлення; міжнародне співробітництво та стандартизація.

Триваючий конфлікт високої інтенсивності зумовлює значну небезпеку, в тому числі й для довкілля^{2,3,4} та унікальність розмінування території України. Практика систематичного ретельного гуманітарного розмінування – необхідна передумова сталого управління навколишнім природним середовищем в подальшому на постконфліктних територіях, адже дозволить запобігти та мінімізувати деградацію ґрунтів, земельних ресурсів, біорізноманіття, забруднення цих компонентів, викиди забруднюючих речовин, які можуть навіть сприяти зміні клімату, а також сприяти збереженню природних ресурсів⁵.

Питання вивчення підходів та інноваційних технологій у гуманітарному розмінуванні знайшло відображення у багатьох наукових працях. Зокрема, досліджували мінну загрозу як одну з головних перешкод для безпеки населення, її вплив на сільськогосподарські землі та складність їхнього відновлення^{6,7,8}; створення карт небезпечних зон для полегшення гуманітарного розмінування в країнах з великою кількістю мін⁹; використання новітніх сенсорних технологій, таких як GPR і ЕМІ, для підвищення точності виявлення мін¹⁰, автоматизовані системи, дрони і робототехніку для

² Герасимчук Л.О. Військові дії як чинник утворення відходів. *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 133. С. 305-312. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.41>.

³ Герасимчук Л.О., Валерко Р.А., Ярошенко Б.О., Члек О.М. Загрози довкілля внаслідок військових дій очима дітей. *Екологічні науки*. 2022. № 4 (43). С. 168-173. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.28>.

⁴ Валерко Р.А., Герасимчук Л.О., Примера І.О. Оцінка розміру шкоди для довкілля, спричинена військовими діями. *Таврійський науковий вісник*. 2022. № 126. С. 251-258. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.126.35>.

⁵ Герасимчук Л.О., Пацева І.Г., Валерко Р.А. Гуманітарне розмінування України. *Аграрні інновації*. 2024. №24. С. 232-238. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.24.33>.

⁶ Robinson T., O'Keeffe R. The Challenges of Humanitarian Mine Clearance in Ukraine. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*. 2019. Vol. 23, no. 1. P. 17-23. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol23/iss1/8>.

⁷ Pedraza P. D. Ethical disconcertment and the politics of troublemaking. *American Ethnologist*. 2003. Vol. 50. P. 462–473. DOI: <https://doi.org/10.1111/amet.13198>.

⁸ Habib M. K. Humanitarian demining: Difficulties, needs and the prospect of technology. 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan, 2008. P. 213-218. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMA.2008.4798754>.

⁹ Kostelnick J. C., Dobson J. E., Egbert S. L., Dunbar M. D. Cartographic Symbols for Humanitarian Demining. *The Cartographic Journal*. 2008. Vol. 45, no. 1. P., 18–31. DOI: <https://doi.org/10.1179/000870408X276585>.

¹⁰ Sato M., Takahashi K. Development of Dual Sensors and Deployment in Mine Affected Countries. In: Furuta K., Ishikawa J. (eds). *Anti-personnel Landmine Detection for Humanitarian Demining*. Springer, London, 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-84882-346-4_3.

зменшення ризиків і підвищення ефективності розмінування¹¹ та для покращення результатів виявлення мін; необхідність удосконалення алгоритмів обробки даних для зменшення кількості хибних сигналів від металодетекторів¹². У екологічних аспектах дослідження відзначено важливість швидкого очищення територій для запобігання довготривалим наслідкам, негативний вплив мін на забруднення водних ресурсів і деградацію ґрунтів, аналіз методів очищення забруднених земель з урахуванням екологічних стандартів та вимог, технології розмінування, які дозволяють мінімізувати вплив на природне середовище. Наявні дослідження стосовно використання дронів для оцінки екологічних ризиків та планування заходів з розмінування¹³, моделі управління проектами для розчищення водних акваторій від потенційно небезпечних об'єктів за допомогою роботизованих систем, що забезпечують ефективність обробки інформації про об'єкти¹⁴.

Інформаційною базою досліджень стала реферативна наукометрична база даних наукових публікацій Web of Science (WoS) за ключовими словами "humanitarian demining". Для візуалізації даних бібліографічної бази даних Web of Science застосовували VOSviewer – програмний інструмент для створення карт на основі мережевих даних, що є у вільному доступі. Програмний інструмент VOSviewer, що показує, як різні терміни або ключові слова використовуються в контексті наукових публікацій або досліджень, зв'язки між вузлами (термінами) представляють частоту спільного вживання або цитування, а товщина ліній між ними вказує на силу цих зв'язків. Кольори груп термінів на схемі вказують на різні тематичні кластери, що показують зв'язки між конкретними аспектами дослідження. Робота з VOSviewer допомагає автоматизувати аналіз великих масивів текстових даних і побудувати візуальні семантичні мережі, що дає змогу виявити основні

¹¹ Hassan M. I., Ahmat D., Ouya S. Technologies Behind the Humanitarian Demining: A Review. 2024 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets), Harrisonburg, VA, USA, 2024. P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/SmartNets61466.2024.10577706>.

¹² Zyada Z., Kawai Y., Matsuno T., Fukuda T. Fuzzy Sensor Fusion for Humanitarian Demining. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*. 2007. Vol. 11, no. 7. P. 735-744. DOI: <https://doi.org/10.20965/jaciii.2007.p0735>.

¹³ Theera-Umpon N., Auephanwiriyakul S. Unexploded ordnance detection by measuring object symmetry via linear prediction. 2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004, Chiang Mai, Thailand, 2004. P. 195-198. DOI: <https://doi.org/10.1109/TENCON.2004.1414390>.

¹⁴ Грицаєнко М. Г. Концептуальна модель управління проектами роботизованого очищення акваторій від підводних потенційно небезпечних об'єктів. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2018. № 1 (9). С. 15–20. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/4622>.

напрями досліджень, їхні взаємозв'язки і створити чітке уявлення про структуру предметної області.

1. Аналіз наукометричної бази Web of Science Core Collection за запитом "humanitarian demining" ("гуманітарне розмінування")

У наукометричній базі Web of Science Core Collection знайдено 460 результатів за запитом "humanitarian demining". В розрізі 1996 – 2024 рр. найбільша кількість публікацій за даними ключовими словами у 2003 р. – 33 (або 7,2%). У 2005 р. було опубліковано 29, 2006 р. – 26, 2004 р. і 2016 р. – 24, 2024 р. – 11 таких наукових праць (рис. 1).

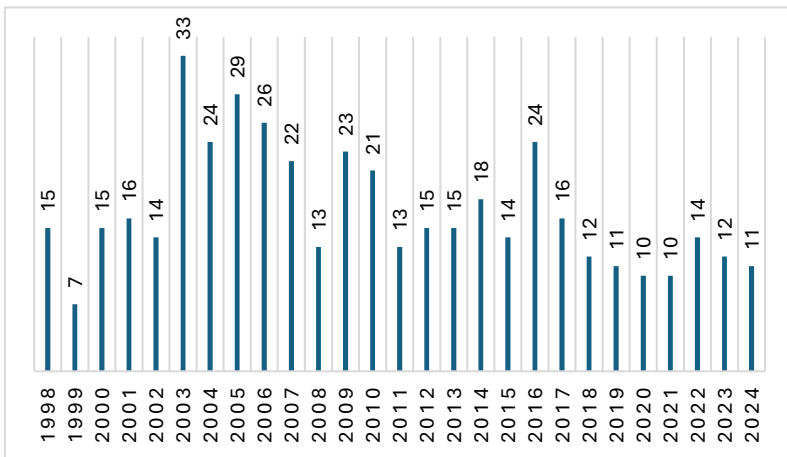


Рис. 1. Кількість публікацій у наукометричній базі Web of Science Core Collection за запитом "humanitarian demining" за період 1998–2024 рр.

Серед 460 наукових праць у наукометричній базі Web of Science, 350 уточнені за Цілями сталого розвитку, зокрема ЦСР06 (Чиста вода та належні санітарні умови) – 148 публікацій, ЦСР11 (Сталий розвиток міст та спільнот) – 94 публікації, ЦСР03 (Міцне здоров'я і благополуччя) – 69, ЦСР13 (Пом'якшення наслідків зміни клімату) – 10, ЦСР04 (Якісна освіта) – 9, ЦСР15 (Захист екосистем суші) – 8, ЦСР02 (Подолання голоду) – 5, ЦСР16 (Мир, справедливість та сильні інститути) – 3, ЦСР12 (Відповідальне споживання та виробництво) – 2 та ЦСР09 (Промисловість, інновації та інфраструктура) і ЦСР14 (Збереження морських ресурсів) – по 1 публікації (рис. 2).

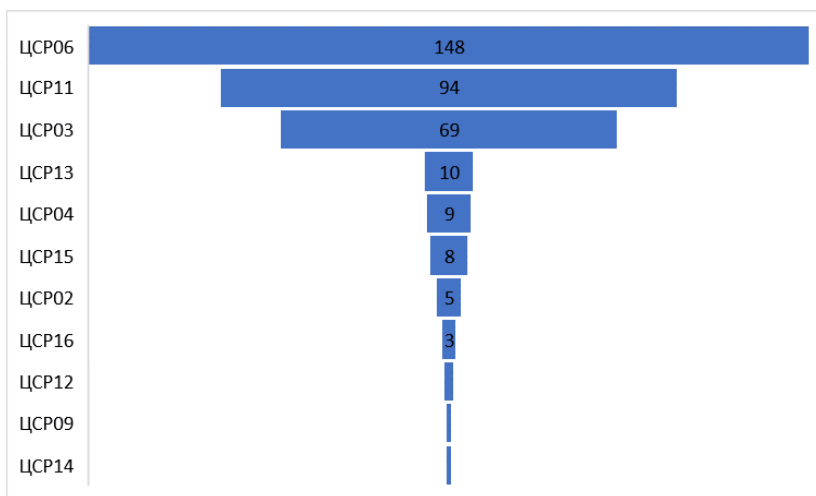


Рис. 2. Кількість публікацій у наукометричній базі Web of Science Core Collection за запитом «humanitarian demining» з уточненням за Цілями сталого розвитку за період 1998–2024 рр.

На основі наукових праць, знайдених у наукометричній базі Web of Science за запитом "humanitarian demining", визначено основні компоненти, які описують процес гуманітарного розмінування та відповідні підходи:

1. Детекція мін та інших вибухонебезпечних об'єктів: методи виявлення, що описані в літературі, можуть включати різні технології (магнітометрія, інфрачервона спектроскопія, детектори металів та радіолокація); сучасні підходи можуть поєднувати кілька методів для підвищення точності та зниження ймовірності помилкових спрацювань.

2. Технічні засоби для розмінування: можуть включати як механічні, так і автоматизовані системи (наприклад, роботи для дистанційного розмінування, які використовують штучний інтелект для ідентифікації та знешкодження мін; використання дронів з різними типами сенсорів для сканування великих територій).

3. Аналіз ризиків і планування операцій розмінування: сюди входить оцінка небезпек і прогнозування найбільш ймовірних місць розташування мін на основі історичних даних, а також оптимізація маршрутів для ефективного та безпечного виконання операцій.

4. Розробка алгоритмів для обробки даних: застосування машинного навчання для аналізу великих масивів даних і визначення ознак вибухонебезпечних об'єктів, методи підвищення надійності виявлення шляхом комбінування даних з різних джерел.

металів") – показують застосування фізичних методів для виявлення мін та вибухонебезпечних предметів; теми регіонів, як "Cambodia" (Камбоджа) та "Colombia" (Колумбія), є географічними вузлами, пов'язаними з гуманітарним розмінуванням через наявність значної кількості мін та інших вибухових пристроїв.

Червоний сектор (центральний) – технічні методи розмінування – включає терміни, пов'язані з технічними підходами до виявлення мін, такими як "ground-penetrating radar" ("наземний проникаючий радар"), "mine detection" ("виявлення мін"), "electromagnetic induction" ("електромагнітна індукція"), "metal detection" ("виявлення металів"), "sensor fusion" ("злиття даних сенсорів") та інші. Даний кластер зосереджений на методах обробки сигналів, використанні різних технологій для виявлення мін і UXO (нерозірваних боєприпасів). Пов'язані поняття, такі як "signal processing" ("обробка сигналів") і "classification" ("класифікація"), вказують на дослідження алгоритмів та методів аналізу даних.

Зелений сектор – вибухові речовини та боєприпаси – включає терміни "explosives" ("вибухові речовини"), "landmine" ("міна"), "UXO" ("нерозірвані боєприпаси"), "buried objects" ("поховані об'єкти"), а також технології для їх виявлення. Цей кластер пов'язаний з проблемами безпеки, спричиненими вибуховими залишками війни, а також методами їх виявлення і знешкодження.

Синій сектор – географічний контекст та регіональні дослідження – містить терміни, пов'язані з конкретними регіонами, такими як Камбоджа і Колумбія, де питання розмінування є актуальними. Тут також є терміни, пов'язані з застосуванням технологій, таких як "dual sensor" ("подвійний сенсор"), "SAR" ("синтетична апертурна радіолокація"), що можуть бути використані в конкретних умовах.

Жовтий сектор – роботизація і автоматизація – охоплює терміни "robot" ("робот"), "UAV" ("безпілотні літальні апарати"), "robotics" ("робототехніка"), що вказує на дослідження з автоматизації процесу розмінування, застосування безпілотних систем і роботизованих технологій для підвищення безпеки і ефективності гуманітарного розмінування.

Чорний сектор – обробка даних та аналітика – містить терміни "fusion" ("злиття"), "multisensor" ("багатосенсорні системи"), "data fusion" ("злиття даних"), що стосуються аналізу і поєднання даних з різних джерел. Пов'язаний з алгоритмами та технологіями, що підвищують точність виявлення мін через інтеграцію різноманітних сенсорних даних.

Кожен сектор має свої особливості, але всі вони об'єднуються навколо центральної теми гуманітарного розмінування, яка залучає

різні наукові та технічні підходи для вирішення проблем гуманітарного розмінування.

3. Кластерний аналіз

Кластер 1 (червоний колір) у візуалізації VOSviewer представляє технічні методи, які використовуються для гуманітарного розмінування, і включає ключові слова, пов'язані з різними технологіями виявлення мін, обробкою сигналів і інтеграцією даних; налічує 20 термінів: "data fusion" ("злиття даних"), "field" ("поле"), "fusion" ("злиття"), "ground penetrating radar (GPR)", "ground penetrating radar", "ground-penetrating radar" (GPR), "ground-penetrating radar" ("наземний проникаючий радар"), "HSTAMIDS" ("ручна система віддаленого виявлення мін"), "humanitarian demining" ("гуманітарне розмінування"), "mine detection" ("виявлення мін"), "land mine detection" ("виявлення протипіхотних мін"), "machine learning" ("машинне навчання"), "magnetic-susceptibility" ("магнітна сприйнятливість"), "metal detector" ("металодетектор"), "migration" ("міграція"), "multisensor" ("мультисенсор"), "sensor fusion" ("сенсорне злиття"), "soil" ("грунт"), "soil electromagnetic properties" ("електромагнітні властивості ґрунту"), "viscosity" ("в'язкість").

Наземний проникаючий радар ("ground-penetrating radar") – є ключовою технологією, яка застосовується для проникнення у ґрунт і виявлення об'єктів без необхідності фізичного втручання, що зменшує вплив на екосистему: досліджено використання GPR для гуманітарного розмінування, описано систему ALIS, яка поєднує GPR з металодетектором для виявлення підземних об'єктів, зокрема мін, а застосування SAR-обробки дозволяє зменшити шум від ґрунту і підвищити точність^{15,16,17,18}; описані методи видалення перешкод з даних GPR для виявлення мін, що є важливим аспектом підвищення їх

¹⁵ Sato M. Development and Field Trials of ALIS, a Dual Sensor System for Humanitarian Demining. Proceedings of the 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Sciences Meeting. 2010. P. 1-4.

¹⁶ Sato M. GPR evaluation test for humanitarian demining in Cambodia. 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI, USA, 2010. P. 4322-4325. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5649837>.

¹⁷ Sato M., Kikuta K. Dual Sensor "Alis" for Humanitarian Demining. IGARSS 2018 – 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018. P. 8428-8431. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517439>.

¹⁸ Feng X., Sato M. Landmine imaging by a hand-held GPR and metal detector sensor (ALIS). Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05., Seoul, Korea (South), 2005. P. 4. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2005.1526187>.

точності^{19,20}; розглянуто можливості використання GPR для розмінування в Україні, де складні ґрунтові умови створюють багато перешкод²¹.

У сфері виявлення мін ("mine detection") запропоновано алгоритм для злиття даних від GPR і металодетектора, що підвищує точність і знижує кількість хибних тривог, що особливо важливо для виявлення мін у складних умовах; наведені сучасні методи виявлення мін, включаючи поєднання різних технологій, таких як GPR, металодетектори, а також використання безпілотників з сенсорами для широкомасштабного виявлення мін, а також машинне навчання для аналізу даних GPR у Колумбії^{22,23}.

Злиття даних ("data fusion") дозволяє поєднувати результати від кількох сенсорів, таких як GPR і металодетектори, для зменшення помилкових тривог і підвищення точності²⁴.

Польові дослідження ("field") забезпечують реальні дані для оцінки ефективності технологій розмінування у складних умовах, де сенсорні методи можуть зіштовхуватися з природними перешкодами.

Система HSTAMIDS (Handheld Stand-Off Mine Detection System) використовує поєднання GPR і металодетекції, щоб підвищити точність виявлення мін і знизити ризик для операторів, працюючи на відстані^{25,26}.

¹⁹ Genderen P. The effect of phase noise in a stepped frequency continuous wave ground penetrating radar. 2001 CIE International Conference on Radar Proceedings (Cat No.01TH8559), Beijing, China, 2001. P. 581-584. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICR.2001.984784>.

²⁰ Potin D., Duflos E., Vanheeghe P. Landmines Ground-Penetrating Radar Signal Enhancement by Digital Filtering. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Sept. 2006. Vol. 44, no. 9. P. 2393-2406. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.875356>.

²¹ Bechtel T., Truskavetsky S., Capineri L., Pochanin G., Simic N., Viatkin K. A survey of electromagnetic characteristics of soils in the Donbass region (Ukraine) for evaluation of the applicability of GPR and MD for landmine detection. 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Hong Kong, China, 2016. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2016.7572688>.

²² Henao A. D. P., Perdomo O. J. M. Humanitarian Demining in the Colombian Post-Conflict Period: A Legal-Political Perspective. *Desafios*. 2020. Vol. 32, no. 1. P. 1-39. DOI: <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/desafios/a.6389>.

²³ Gutierrez S., Pantoja J. J., Ruiz E. F., González N., Vega F., Baer C., Sachs J., Kasmi C. Advances on the detection of Landmines and IEDs in Colombia using UWB GPR and Machine Learning Techniques. 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Dusseldorf, Germany, 2021. P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.23919/EuCAP51087.2021.9411214>.

²⁴ Zyada Z., Matsuno T., Hasegawa Y., Sato S., Fukuda T. Advances in GPR-based landmine automatic detection. *J. Frankl. Inst.* 2011. Vol. 348. P. 66-78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2009.02.014>.

²⁵ Doroftei I., Baudoin Y. A concept of walking robot for humanitarian demining. *Industrial Robot*. 2012. Vol. 39, no. 5. P. 441-449. DOI: <https://doi.org/10.1108/01439911211249733>.

²⁶ Doroftei I., Baudoin Y. Using mobile robots for a clean and safe environment – A difficult challenge. 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, Romania, 2012. P. 41-46. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2012.6463600>.

Електромагнітна індукція ("electromagnetic induction" (EMI)) – важлива технологія у сфері гуманітарного розмінування, оскільки вона дозволяє виявляти металеві об'єкти, такі як міни та нерозірвані боеприпаси, які залишилися в ґрунті після збройних конфліктів, а її використання забезпечує високий рівень точності, дозволяючи визначати підземні об'єкти без необхідності фізичного втручання у ґрунт. Розглянуто вплив характеристик ґрунту на електромагнітну індукцію^{27,28}, використання для зниження ризиків при розмінуванні, розроблено мобільний EMI-детектор для роботи на гусеничній платформі²⁹.

Визначено, що різні ґрунти ("soil") та їх характеристики можуть істотно впливати на точність виявлення мін, а їх знання дозволять оптимізувати роботи з розмінування^{30,31}, вивчено вплив різних типів ґрунту на роботу сенсорів, особливо EMI та GPR.

Виявлення протипіхотних мін ("land mine detection") на сьогоднішній день є серйозною проблемою політичного, економічного, екологічного та гуманітарного масштабів у багатьох країнах світу³², є критичною проблемою для постконфліктних регіонів, а сенсорні системи і алгоритми допомагають забезпечити точність і швидкість розмінування.

²⁷ Das Y., McFee J.E., Russell K.L., Cross G.M., Katsube T. Soil information requirements for humanitarian demining: the case for a soil properties database. *Detection And Remediation Technologies For Mines And Minelike Targets VIII*, 2003. P. 1146-1157. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.486306>.

²⁸ Schultz G., Miller J., Keranen J. Electromagnetic Packable Technology (EMPACT) for Detection and Characterization of Ordnance in Post-Conflict Areas. *Proc SPIE*. 2013:8709. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2016241>.

²⁹ Petrișor S. M., Simion M., Bârsan G., Hancu O. Humanitarian Demining Serial-Tracked Robot: Design and Dynamic Modeling. *Machines*. 2023. Vol. 11, no. 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11050548>.

³⁰ Obhodaš J., Vdović N., Valković V. Dynamics of soil parameters relevant for humanitarian demining. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2005. Vol. 241, no. 1–4. P. 759-764. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.07.130>.

³¹ Druyts P., Das Y., Craeye C., Acheroy M. Effect of the soil on the metal detector signature of a buried mine. *Proc. SPIE 6217, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XI*, 62170Q (17 May 2006). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.666954>.

³² Khamis A. Minesweepers: Towards a Landmine-Free Egypt, an Outdoor Humanitarian Demining Robotic Competition. *The Journal of ERW and Mine Action*. 2013. Vol. 17, no. 1, URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol17/iss1/5>.

Алгоритми машинного навчання ("Machine Learning") здатні аналізувати великі обсяги даних, отриманих з різних сенсорів, і підвищувати точність розпізнавання вибухонебезпечних об'єктів^{33,34,35}.

Зазначені наукові праці відображають широке коло досліджень, спрямованих на вдосконалення технологій виявлення мін, зокрема використання інноваційних методів обробки сигналів, злиття даних з різних сенсорів та адаптацію до різних умов ґрунту.

Кластер 2 (зелений колір) у схемі VOSviewer відображає дослідження, пов'язані з вибухонебезпечними об'єктами, такими як міни, нерозірвані боєприпаси, вибухові речовини та методи їх виявлення; містить 9 термінів: "demining" ("розмінування"), "explosives" ("вибухові речовини"), "humanitarian" ("гуманітарний"), "landmines" ("міни"), "mine action" ("дії з розмінування"), "robot" ("робот"), "robotics" ("робототехніка"), "robots" ("роботи"), "system" ("система").

Визначено, що розмінування ("demining") є критично важливим завданням, яке знижує ризик для людей та сприяє відновленню земель, а розвиток технологій розмінування з фокусом на екологічну безпеку дозволяє здійснювати цей процес із мінімальним впливом на навколишнє середовище; вибухові речовини ("explosives") є значною загрозою для довкілля, а методи їх виявлення та утилізації є важливими для збереження природного середовища; гуманітарний аспект ("humanitarian") є пріоритетом у міжнародній спільноті, оскільки мінімізує ризики для населення і підтримує екологічну безпеку; питання знешкодження мін ("landmines") у природному середовищі вимагає спеціалізованих підходів для мінімізації шкоди; дії з розмінування ("mine action") включають екологічні вимоги, такі як запобігання хімічному забрудненню від боєприпасів; технології робототехніки ("robotics") розроблені для роботи в складних екологічних умовах, дозволяють зменшити шкоду для довкілля.

³³ Verre W., Özdeğer T., Gupta A., Podd F.J.W., Peyton A.J. Threat Identification in Humanitarian Demining Using Machine Learning and Spectroscopic Metal Detection. In: Yin, H., Camacho, D., Tino, P., Tallón-Ballesteros, A., Menezes, R., Allmendinger, R. (eds) *Intelligent Data Engineering and Automated Learning – IDEAL 2019*. IDEAL 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11871. Springer, Cham, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33607-3_58.

³⁴ Otagaki Y., Barras J., Kosmas P. Improving Detection of a Portable NQR System for Humanitarian Demining Using Machine Learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022. Vol. 60, no. 1001311. P. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3101226>.

³⁵ Saliba A., Tout K., Zaki C., Claramunt C. Bridging Human Expertise with Machine Learning and GIS for Mine Type Prediction and Classification. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2024. Vol. 13, no. 259. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi13070259>.

Зокрема, представлені досягнення та вузькі місця в дослідженнях з гуманітарного розмінування³⁶, його роль у міжнародній стабільності³⁷; оптимізація робочих процесів у гуманітарному розмінуванні за допомогою спрощеної панелі інструментів для прискорення повторюваних завдань (START) для ArcGIS³⁸; економіко-правовий вимір гуманітарного розмінування в Україні³⁹; розробка стійкої роботизованої платформи з відкритим кодом для гуманітарного розмінування⁴⁰; небезпеки, труднощі і виклики, потреби, перспективи та контроль якості в гуманітарному розмінуванні^{41,42}. Наявні дослідження, що спрямовані на розробку робототехніки та навігаційних технологій для гуманітарного розмінування⁴³, зокрема концепції крокуючого робота, мультиробота Remex-VE як спроби зменшити розрив між рівнем досліджень і реальними потребами на місцях⁴⁴.

Відзначено й використання космічних засобів для допомоги в розмінуванні⁴⁵, представлено концепцію децентралізованого зберігання

³⁶ Sahli H., Bruschini C., Kempen L., Schleijsen R., den Breejen E. Achievements & bottlenecks in humanitarian demining EU-funded research: Final results from the EC DELVE project. *Proc SPIE*. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.790417>.

³⁷ Kopacek P. Humanitarian Demining for International Stability. *IFAC Proceedings*. 2001. Vol. 34, no. 21. P. 85-89. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)33025-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)33025-2).

³⁸ Lacroix P., de Roulet P., Ray N. Simplified Toolbar to Accelerate Repeated Tasks (START) for ArcGIS: Optimizing Workflows in Humanitarian Demining. *International Journal of Applied Geospatial Research (IJAGR)*. 2014. Vol. 5, no. 4. P. 87-94. DOI: <https://doi.org/10.4018/ijagr.2014100106>.

³⁹ Ustymenko V., Rohozian Y., Trehub O., Liashenko P., Zablodska D. Economic and legal dimension of humanitarian demining of Ukraine: problem and research prospects. *Amazonia Investiga*. 2023. Vol. 12, no. 65. P. 287-295. DOI: <https://doi.org/10.34069/AI/2023.65.05.27>.

⁴⁰ Cepolina E., Parmiggiani A., Canali C., Cannella F. Disarmadillo: an open source, sustainable, robotic platform for humanitarian demining. *ACTA IMEKO*. 2022. Vol. 11, no. 3. P. 1-9. DOI: https://doi.org/11.1.10.21014/acta_imeko.v11i3.1262.

⁴¹ Ekenberg L., Fasth T., Larsson A. Hazards and Quality Control in Humanitarian Demining. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2018. Vol. 35, no. 4. P. 897-913. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-01-2016-0012>.

⁴² Eriksson D. The Challenges Facing A Humanitarian Mis. A Study of the Information Management System for Mine Action in Iraq. 2010. INFORMATION SYSTEMS FOR EMERGENCY MANAGEMENT 16. P. 175-192.

⁴³ Habib M. K. Development of robot and navigation techniques for humanitarian demining. 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, Daejeon, Korea (South), 2008. P. 418-423. DOI: <https://doi.org/10.1109/INDIN.2008.4618135>.

⁴⁴ Habib M.K.. Multi robotic system and the development of cooperative navigation behaviors for humanitarian demining. 16th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 16th '11). P. 553-556. URL: <https://alife-robotics.co.jp/members2011/icarob/data/papers/OS23/OS23-2.pdf>.

⁴⁵ Kruijff M., Eriksson D., Bouvet T., Griffiths A., Craig M., Sahli H., Valcarce González-Rosón F., Willekens P., Ginati A. Space assets for demining assistance. *Acta Astronautica*. 2013. Vol. 83. P. 239-259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.08.016>.

місць знаходження наземних мін та нерозірваних боєприпасів⁴⁶ та моделювання рельєфу місцевості і відстеження за допомогою маніпулятора для покращення загального виявлення, створення точних карт ймовірних місць розташування мін⁴⁷.

В цілому зелений сектор відображає дослідження, спрямовані на покращення методів виявлення вибухонебезпечних об'єктів. Роботи авторів демонструють різні підходи до вирішення проблем виявлення та нейтралізації мін та інших вибухових речовин.

Кластер 3 (синій колір) містить 8 термінів: "ALIS" (Advanced Landmine Imaging System) ("система візуалізації мін ALIS"), Cambodia (Камбоджа), Colombia (Колумбія), "dual sensor" ("подвійний сенсор"), "GRP" ("наземний проникаючий радар"), "land mines" ("міни"), "SAR" (Synthetic Aperture Radar) ("радар із синтезованою апертурою"), "UAV" (Unmanned Aerial Vehicle) ("безпілотний літальний апарат").

В наукових працях щодо гуманітарного розмінування Камбоджи наведено відомості щодо застосування подвійного датчика для гуманітарного розмінування ALIS, який являє собою комбінацію датчика електромагнітної індукції (EMI) і георадара (GPR), яким було виявлено понад 80 мін з 2009 р.^{48, 49}). Дана технологія широко використовується для точного виявлення мін, а також дозволяє знизити вплив на ґрунт завдяки безконтактному методу сканування⁵⁰. Є й інші дослідження, що проводилися на територіях Колумбії, Єгипту, Іраку.

SAR-технології дозволяють отримувати високоточні дані про забруднені мінами території, що сприяє ефективному очищенню і мінімізації пошкоджень ґрунту.

Безпілотні літальні апарати ("UAV") забезпечують ефективно та швидко сканування забруднених мінімими полями територій, не пошкоджуючи ґрунт чи рослинний покрив, а також можуть збирати дані

⁴⁶ Horvat M., Krmpotić K., Andrija K., Akagic A. Bridging Blockchain Technology and Humanitarian Demining: A Novel Concept for Decentralized Storage of Landmine and UXO Locations. 34th International Scientific Central European Conference on Information and Intelligent Systems (CECIIS). 2023. P. 369-375. URL: <https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-skup/803059>.

⁴⁷ Freese M., Singh S., Singhose W.E., Fukushima E., Hirose S. Terrain Modeling and Following Using a Compliant Manipulator for Humanitarian Demining Applications. *Springer Tracts in Advanced Robotics*. 2009. Vol. 62. P. 3-12. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-13408-1_1.

⁴⁸ Sato M., Takahashi K. Deployment of dual-sensor ALIS for humanitarian demining in Cambodia. *Proc SPIE*. 2013. Vol. 8709. DOI: <https://doi.org/8709.10.1117/12.2015508>.

⁴⁹ Sato M. Dual sensor technology of landmine clearance and its applications to survey in natural disaster. *Proc. SPIE 10182, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXII*, 101820Y (3 May 2017). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2262036>.

⁵⁰ Sato M. Evaluation test of ALIS in Cambodia for humanitarian demining", *Proc. SPIE 7664, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XV*, 76641P (29 April 2010). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.849393>.

для картографування ризиків. В наукових працях наведені результати розробки і тестування автоматизованої методики дистанційного виявлення з БПЛА та ідентифікації протипіхотних мін⁵¹, аналіз ефективності та моделювання роботи металодетектора безперервної хвилі для застосування в БПЛА⁵² для гуманітарного розмінування.

Кластер 4 (жовтий колір) містить 7 термінів: "antipersonnel landmine" ("протипіхотна міна"), "buried objects" ("поховані об'єкти"), "detection" ("виявлення"), "land mine detection" ("виявлення протипіхотних мін"), "landmine" ("міна"), "mines" ("міни"), "UXO" (Unexploded Ordnance) ("нерозірвані боеприпаси").

Ці терміни часто використовуються в гуманітарному розмінуванні для позначення об'єктів, пов'язаних із мінними полями та вибухонебезпечними залишками війни, а також для опису процесів виявлення та знешкодження.

Протипіхотні міни ("antipersonnel landmine") являють собою значну небезпеку як для здоров'я людини, так і створюють перешкоди використанню земель. Проблема розмінування територій, забруднених мінами ("landmine", "mine"), є надзвичайно актуальною для відновлення земель у постконфліктних регіонах. Виявлення похованих об'єктів ("buried objects") таких, як протипіхотні міни та нерозірвані боеприпаси – є важливим для зменшення ризиків та захисту екосистем, використання ж технологій GPR та ЕМІ мінімізують втручання в ґрунт. Представлено ідентифікацію похованого об'єкта на основі пікового розсіювання за допомогою системи подвійного датчика GPR-ЕМІ, як невід'ємної частини процесу гуманітарного розмінування, що дає змогу значно знижувати загальні витрати на локалізацію наземних мін⁵³. Визначення матеріалу, з якого зроблені поховані об'єкти, може значно сприяти їх розпізнаванню або класифікації, що є надзвичайно важливим для виявлення закопаних протипіхотних мін у контексті гуманітарного розмінування⁵⁴.

Сучасні методи виявлення ("detection") включають багатосенсорні підходи, що дозволяють скоротити негативний вплив на довкілля

⁵¹ Baur J., Steinberg G., Nikulin A., Chiu K., de Smet T. S. Applying Deep Learning to Automate UAV-Based Detection of Scatterable Landmines. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12050859>.

⁵² Romero I., Walter T., Mariager S. Performance Analysis and Simulation of a Continuous Wave Metal Detector for UAV Applications. IGARSS 2022 – 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Jul. 2022. P. 7222-7225. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9883102>.

⁵³ Yoldemir B., Sezgin M. Peak scatter-based buried object identification using GPR-EMI dual sensor system. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2019. Vol. 34, no. 4. P. 339–353. DOI: <https://doi.org/10.1080/10589759.2019.1623213>.

⁵⁴ Stepanić J., Wüstenberg H., Krstelj V., Mrasek H. Contribution to classification of buried objects based on acoustic impedance matching. *Ultrasonics*. 2003. Vol. 41, no. 2. P. 115-123. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(02\)00431-6](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00431-6).

звдяки зниженню хибних тривог та необхідності у великих фізичних зонах сканування.

Інноваційні технології виявлення мін ("land mine detection"), як-от застосування безпілотників та роботизованих систем, дозволяють проводити екологічно безпечне розмінування.

Нерозірвані боєприпаси ("UXO") викликають довгострокове забруднення територій, що впливає на здоров'я людей і природні екосистеми. Інноваційні технології дозволяють ефективно виявляти та утилізувати такі об'єкти. Проте надійне та економічно ефективне виявлення та геофізичне картографування ділянок, забруднених боєприпасами, що не вибухнули, такими як касетні боєприпаси, покинуті боєприпаси та саморобні вибухові пристрої, залежить від здатності відрізнити небезпечні предмети від металевих предметів⁵⁵.

Кластер 5 (сірий колір) містить 7 термінів: "classification" ("класифікація"), "discrimination" ("дискримінація, розрізнення"), "electromagnetic induction" ("електромагнітна індукція"), "explosive remnants of war" (ERW) ("вибухонебезпечні залишки війни"), "metal detection" ("металодетекція"), "signal processing" ("обробка сигналів"), "unexploded ordnance" (UXO) ("нерозірвані боєприпаси").

Швидка та точна класифікація ("classification") боєприпасів, що не вибухнули, є нагальною потребою як у військовому, так і в контексті гуманітарного розмінування, а автоматизований алгоритм значно зробіть завдання безпечнішим, зручнішим і дешевшим. Розроблено класифікатор, точність якого виявилася на 97,1%⁵⁶; представлено новий метод зондування для розпізнавання матеріалів і класифікації матеріалів (інтелектуальний зонд)⁵⁷.

Наявність бази даних, що містить властивості ґрунтів країн, які постраждали від наземних мін, допомогла б прогнозувати ефективність місцевих детекторів, планувати операції з розмінування, проектувати і розробляти вдосконалені детектори і створювати реалістичні і репрезентативні об'єкти для проведення випробувань і оцінки. Описано кампанію з визначення характеристик ґрунту і методикою класифікації

⁵⁵ Schultz G. M., Keranen J., Miller J. S., Shubitidze F. Acquisition and processing of advanced sensor data for ERW and UXO detection and classification. Proc. SPIE 9072, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIX, 90720H (9 June 2014). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2050876>.

⁵⁶ Lebbad A., Clayton G., Nataraj C. Classification of UXO Using Convolutional Networks Trained on a Limited Dataset. 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Cancun, Mexico, 2017. P. 1098-1101. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMLA.2017.000-1>.

⁵⁷ Baglio S., Cantelli L., Giusa F., Muscato G. Intelligent Prodder: Implementation of Measurement Methodologies for Material Recognition and Classification With Humanitarian Demining Applications. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Aug. 2015. Vol. 64, no. 8. P. 2217-2226. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2386917>.

саморобних вибухових пристроїв на основі методу опорних векторів⁵⁸, а також їх класифікацію з використанням багаторівневого проєктивного словникового навчання⁵⁹.

У дослідженнях із класифікації мін та УХО алгоритми машинного навчання дозволяють розрізняти вибухонебезпечні та безпечні об'єкти, зменшуючи кількість хибних тривог і забезпечуючи безпечне використання земель.

Практика приміських зон Афганістану дозволила визначити, що ідентифікація будівель і картографування просторового розподілу різних типів ґрунтового покриття має велике практичне значення⁶⁰.

Металодетектори є основним методом виявлення мін і УХО. Вони забезпечують безпеку і збереження природного середовища, оскільки дозволяють уникати непотрібних розкопок.

Алгоритми обробки сигналів ("signal processing") дозволяють підвищити точність виявлення вибухонебезпечних об'єктів, зменшуючи кількість хибних тривог та вплив на екосистему за рахунок зменшення кількості розкопок. Розкриті аспекти обробки сигналів⁶¹.

Методи дискримінації ("discrimination") об'єктів, такі як використання штучного інтелекту, допомагають розрізняти міни від інших металевих об'єктів, що дозволяє значно зменшити обсяг зайвих робіт. Зокрема, наведені шляхи, за допомогою яких можна отримати більше інформації, ніж просто «наявність металу», за допомогою імпульсно-індукційних (PI) металодетекторів⁶², а також метод виявлення та розпізнавання протипіхотних мін⁶³.

⁵⁸ Pantoja S. G. J. J., Ruiz E. F., González N., Vega F., Baeret C. Advances on the detection of Landmines and IEDs in Colombia using UWB GPR and Machine Learning Techniques. 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Dusseldorf, Germany, 2021. P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.23919/EuCAP51087.2021.9411214>.

⁵⁹ Tivive F. H. C., Bouzardoum A., Abeynayake C. Classification of Improvised Explosive Devices Using Multilevel Projective Dictionary Learning With Low-Rank Prior. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022. Vol. 60, no. 5110616. P. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3151335>.

⁶⁰ Killeen J., Jaupi L., Barrett B. Impact assessment of humanitarian demining using object-based peri-urban land cover classification and morphological building detection from VHR Worldview imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2022. Vol. 27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100766>.

⁶¹ Marc A., Verlinde P. Humanitarian demining: sensor design and signal processing aspects. In book: *Detection of Explosives and Landmines*. 2011. P.39-56. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-010-0397-1_4.

⁶² Combrinck M. Transient electromagnetic exploration techniques: can they be applied to the landmine discrimination problem? *Journal of African Earth Sciences*. 2001. Vol. 33, no. 3-4. P. 693-698. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(01\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(01)00086-0).

⁶³ Tbarki K., Said S. B., Ksantini R., Lachiri Z. One-class SVM for landmine detection and discrimination. *International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*, Hammamet, Tunisia, 2017. P. 309-313. DOI: <https://doi.org/10.1109/CADIAG.2017.8075676>.

ВИСНОВКИ

У наукометричній базі Web of Science Core Collection знайдено 460 результатів за запитом "humanitarian demining", з яких 76% уточнені за Цілями сталого розвитку. У результаті візуалізації за допомогою програмного інструменту VOSviewer виокремлено 5 секторів, що мають свої особливості та об'єднуються навколо теми гуманітарного розмінування: червоний сектор (центральний) – технічні методи розмінування, методи обробки сигналів, використанні різних технологій для виявлення мін і нерозірваних боєприпасів; зелений сектор – вибухові речовини та боєприпаси та технології для їх виявлення; синій сектор – географічний контекст та регіональні дослідження; жовтий сектор – роботизація і автоматизація для підвищення безпеки і ефективності гуманітарного розмінування; сірий сектор – обробка даних та аналітика. Візуалізація даних показала зв'язки між ключовими термінами і напрямками досліджень, що дозволяє краще зрозуміти структуру і комплексність проблем гуманітарного розмінування, а їх інтеграція в екологічну та соціальну стратегії сприятиме відновленню постраждалих регіонів і сталому розвитку постконфліктних.

АНОТАЦІЯ

Дослідження присвячене висвітленню питань гуманітарного розмінування, зосереджуючи увагу на технічних методах розмінування, дослідженнях вибухонебезпечних залишків, роботизованих систем та їх застосування в специфічних географічних умовах, методах виявлення мін, необхідності впровадження інноваційних технологій, безпеці, відновленні постраждалих територій та мінімізації екологічних наслідків. Основними компонентами, які описують процес гуманітарного розмінування є: детекція мін та інших вибухонебезпечних об'єктів; технічні засоби для розмінування; аналіз ризиків і планування операцій розмінування; розробка алгоритмів для обробки даних; методологія оцінки ефективності розмінування. Інформаційною базою досліджень стала реферативна наукометрична база даних наукових публікацій Web of Science (WoS) за ключовими словами "humanitarian demining". Для візуалізації даних бібліографічної бази даних Web of Science застосовували VOSviewer – програмний інструмент для створення карт на основі мережевих даних. Візуалізація на основі наукометричної бази Web of Science за допомогою інструменту VOSviewer представила 5 основних тематичних кластерів. Основні кластери включають: технічні методи розмінування (зокрема, радіолокаційні технології та алгоритми обробки сигналів), дослідження вибухонебезпечних залишків, роботизовані системи та їх застосування

в специфічних географічних умовах. Центральні терміни, як-от "humanitarian demining", "ground penetrating radar", "mine detection", мали найбільшу кількість зв'язків із ключовими технологіями, демонструючи значення багатосенсорних підходів для зниження ризиків і поліпшення точності виявлення. Візуалізація даних допомогла побудувати семантичну мережу, що відображає зв'язки між ключовими аспектами гуманітарного розмінування, демонструючи структуру предметної області та її розвиток у контексті сталого розвитку й безпеки.

Література

1. Про протимінну діяльність в Україні: Закон України від 06.12.2018 № 2642-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19>.
2. Герасимчук Л.О. Військові дії як чинник утворення відходів. *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 133. С. 305-312. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.41>.
3. Герасимчук Л.О., Валерко Р.А., Ярошенко Б.О., Члек О.М. Загрози довкілля внаслідок військових дій очима дітей. *Екологічні науки*. 2022. № 4 (43). С. 168-173. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.28>.
4. Валерко Р.А., Герасимчук Л.О., Примера І.О. Оцінка розміру шкоди для довкілля, спричинена військовими діями. *Таврійський науковий вісник*. 2022. № 126. С. 251-258. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.126.35>.
5. Герасимчук Л.О., Пацева І.Г., Валерко Р.А. Гуманітарне розмінування України. *Аграрні інновації*. 2024. №24. С. 232-238. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrар.innov.2024.24.33>.
6. Robinson T., O'Keeffe R. The Challenges of Humanitarian Mine Clearance in Ukraine. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*. 2019. Vol. 23, no. 1. P. 17-23. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol23/iss1/8>.
7. Pedraza P. D. Ethical disconcertment and the politics of troublemaking. *American Ethnologist*. 2003. Vol. 50. P. 462-473. DOI: <https://doi.org/10.1111/amet.13198>.
8. Habib M. K. Humanitarian demining: Difficulties, needs and the prospect of technology. 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan, 2008. P. 213-218. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMA.2008.4798754>.
9. Kostelnick J. C., Dobson J. E., Egbert S. L., Dunbar M. D. Cartographic Symbols for Humanitarian Demining. *The Cartographic Journal*. 2008. Vol. 45, no. 1. P., 18-31. DOI: <https://doi.org/10.1179/000870408X276585>.
10. Sato M., Takahashi K. Development of Dual Sensors and Deployment in Mine Affected Countries. In: Furuta K., Ishikawa J. (eds).

Anti-personnel Landmine Detection for Humanitarian Demining. Springer, London, 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-84882-346-4_3.

11. Hassan M. I., Ahmat D., Ouya S. Technologies Behind the Humanitarian Demining: A Review. 2024 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets), Harrisonburg, VA, USA, 2024. P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/SmartNets61466.2024.10577706>.

12. Zyada Z., Kawai Y., Matsuno T., Fukuda T. Fuzzy Sensor Fusion for Humanitarian Demining. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*. 2007. Vol. 11, no. 7. P. 735-744. DOI: <https://doi.org/10.20965/jaciii.2007.p0735>.

13. Theera-Umporn N., Auephanwiriyakul S. Unexploded ordnance detection by measuring object symmetry via linear prediction. 2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004, Chiang Mai, Thailand, 2004. P. 195-198. DOI: <https://doi.org/10.1109/TENCON.2004.1414390>.

14. Грицаєнко М. Г. Концептуальна модель управління проектами роботизованого очищення акваторій від підводних потенційно небезпечних об'єктів. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2018. № 1 (9). С. 15–20. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/4622>.

15. Sato M. Development and Field Trials of ALIS, a Dual Sensor System for Humanitarian Demining. Proceedings of the 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Sciences Meeting. 2010. P. 1-4.

16. Sato M. GPR evaluation test for humanitarian demining in Cambodia. 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI, USA, 2010. P. 4322-4325. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5649837>.

17. Sato M., Kikuta K. Dual Sensor “Alis” for Humanitarian Demining. IGARSS 2018 – 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018. P. 8428-8431. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517439>.

18. Feng X., Sato M. Landmine imaging by a hand-held GPR and metal detector sensor (ALIS). Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05., Seoul, Korea (South), 2005. P. 4. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2005.1526187>.

19. Genderen P. The effect of phase noise in a stepped frequency continuous wave ground penetrating radar. 2001 CIE International Conference on Radar Proceedings (Cat No.01TH8559), Beijing, China, 2001. P. 581-584. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICR.2001.984784>.

20. Potin D., Duflos E., Vanheeghe P. Landmines Ground-Penetrating Radar Signal Enhancement by Digital Filtering. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Sept. 2006, Vol. 44, no. 9. P. 2393-2406. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.875356>.

21. Bechtel T., Truskavetsky S., Capineri L., Pochanin G., Simic N., Viatkin K. A survey of electromagnetic characteristics of soils in the Donbass

region (Ukraine) for evaluation of the applicability of GPR and MD for landmine detection. 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Hong Kong, China, 2016. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2016.7572688>.

22. Henao A. D. P., Perdomo O. J. M. Humanitarian Demining in the Colombian Post- Conflict Period: A Legal-Political Perspective. *Desafios*. 2020. Vol. 32, no. 1. P. 1-39. DOI: <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/desafios/a.6389>.

23. Gutierrez S., Pantoja J. J., Ruiz E. F., González N., Vega F., Baer C., Sachs J., Kasmi C. Advances on the detection of Landmines and IEDs in Colombia using UWB GPR and Machine Learning Techniques. 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Dusseldorf, Germany, 2021. P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.23919/EuCAP51087.2021.9411214>.

24. Zyada Z., Matsuno T., Hasegawa Y., Sato S., Fukuda T. Advances in GPR-based landmine automatic detection. *J. Frankl. Inst.* 2011. Vol. 348. P. 66-78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2009.02.014>.

25. Doroftei I., Baudoin Y. A concept of walking robot for humanitarian demining. *Industrial Robot.* 2012. Vol. 39, no. 5. P. 441-449. DOI: <https://doi.org/10.1108/01439911211249733>.

26. Doroftei I., Baudoin Y. Using mobile robots for a clean and safe environment – A difficult challenge. 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, Romania, 2012. P. 41-46. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2012.6463600>.

27. Das Y., McFee J.E., Russell K.L., Cross G.M., Katsube T. Soil information requirements for humanitarian demining: the case for a soil properties database. *Detection And Remediation Technologies For Mines And Minelike Targets VIII*, 2003. P. 1146-1157. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.486306>.

28. Schultz G., Miller J., Keranen J. Electromagnetic Packable Technology (EMPACT) for Detection and Characterization of Ordnance in Post-Conflict Areas. *Proc SPIE*. 2013:8709. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2016241>.

29. Petrișor S. M., Simion M., Bârsan G., Hancu O. Humanitarian Demining Serial-Tracked Robot: Design and Dynamic Modeling. *Machines*. 2023. Vol. 11, no. 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11050548>.

30. Obhodaš J., Vdović N., Valković V. Dynamics of soil parameters relevant for humanitarian demining. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2005. Vol. 241, no. 1–4. P. 759-764. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.07.130>.

31. Druyts P., Das Y., Craeye C., Acheroy M. Effect of the soil on the metal detector signature of a buried mine. *Proc. SPIE 6217, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XI*, 62170Q (17 May 2006). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.666954>.

32. Khamis A. Minesweepers: Towards a Landmine-Free Egypt, an Outdoor Humanitarian Demining Robotic Competition. *The Journal of ERW and Mine Action*. 2013. Vol. 17, no. 1, URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol17/iss1/5>.

33. Verre W., Özdeğer T., Gupta A., Podd F.J.W., Peyton A.J. Threat Identification in Humanitarian Demining Using Machine Learning and Spectroscopic Metal Detection. In: Yin, H., Camacho, D., Tino, P., Tallón-Ballesteros, A., Menezes, R., Allmendinger, R. (eds) *Intelligent Data Engineering and Automated Learning – IDEAL 2019*. IDEAL 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11871. Springer, Cham, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33607-3_58.

34. Otagaki Y., Barras J., Kosmas P. Improving Detection of a Portable NQR System for Humanitarian Demining Using Machine Learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022. Vol. 60, no. 1001311. P. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3101226>.

35. Saliba A., Tout K., Zaki C., Claramunt C. Bridging Human Expertise with Machine Learning and GIS for Mine Type Prediction and Classification. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2024. Vol. 13, no. 259. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi13070259>.

36. Sahli H., Bruschini C., Kempen L., Schleijsen R., den Breejen E. Achievements & bottlenecks in humanitarian demining EU-funded research: Final results from the EC DELVE project. *Proc SPIE*. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.790417>.

37. Kopacek P. Humanitarian Demining for International Stability. *IFAC Proceedings*. 2001. Vol. 34, no. 21. P. 85-89. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)33025-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)33025-2).

38. Lacroix P., de Roulet P., Ray N. Simplified Toolbar to Accelerate Repeated Tasks (START) for ArcGIS: Optimizing Workflows in Humanitarian Demining. *International Journal of Applied Geospatial Research (IJAGR)*. 2014. Vol. 5, no. 4. P. 87-94. DOI: <https://doi.org/10.4018/ijagr.2014100106>.

39. Ustymenko V., Rohozian Y., Trehub O., Liashenko P., Zablodska D. Economic and legal dimension of humanitarian demining of Ukraine: problem and research prospects. *Amazonia Investiga*. 2013. Vol. 12, no. 65. P. 287–295. DOI: <https://doi.org/10.34069/AI/2023.65.05.27>.

40. Cepolina E., Parmiggiani A., Canali C., Cannella F. Disarmadillo: an open source, sustainable, robotic platform for humanitarian demining. *ACTA IMEKO*. 2022. Vol. 11, no. 3. P. 1-9. DOI: https://doi.org/11.1.10.21014/acta_imeko.v11i3.1262.

41. Ekenberg L., Fasth T., Larsson A. Hazards and Quality Control in Humanitarian Demining. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2018. Vol. 35, no. 4. P. 897-913. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-01-2016-0012>.

42. Eriksson D. The Challenges Facing A Humanitarian Mis. A Study of the Information Management System for Mine Action in Iraq.

43. Habib M. K. Development of robot and navigation techniques for humanitarian demining. 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, Daejeon, Korea (South), 2008. P. 418-423. DOI: <https://doi.org/10.1109/INDIN.2008.4618135>.

44. Habib M.K.. Multi robotic system and the development of cooperative navigation behaviors for humanitarian demining. 16th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 16th '11). P. 553-556. URL: <https://alife-robotics.co.jp/members2011/icarob/data/papers/OS23/OS23-2.pdf>.

45. Kruijff M., Eriksson D., Bouvet T., Griffiths A., Craig M., Sahli H., Valcarce González-Rosón F., Willekens P., Ginati A. Space assets for demining assistance. *Acta Astronautica*. 2013. Vol. 83. P. 239-259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.08.016>.

46. Horvat M., Krmpotić K., Andrija K., Akagic A. Bridging Blockchain Technology and Humanitarian Demining: A Novel Concept for Decentralized Storage of Landmine and UXO Locations. 34th International Scientific Central European Conference on Information and Intelligent Systems (CECIIS). 2023. P. 369-375. URL: <https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-skup/803059>.

47. Freese M., Singh S., Singhose W.E., Fukushima E., Hirose S. Terrain Modeling and Following Using a Compliant Manipulator for Humanitarian Demining Applications. *Springer Tracts in Advanced Robotics*. 2009. Vol. 62. P. 3-12. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-13408-1_1.

48. Sato M., Takahashi K. Deployment of dual-sensor ALIS for humanitarian demining in Cambodia. *Proc SPIE*. 2013. Vol. 8709. DOI: <https://doi.org/8709.10.1117/12.2015508>.

49. Sato M. Dual sensor technology of landmine clearance and its applications to survey in natural disaster. Proc. SPIE 10182, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXII, 101820Y (3 May 2017). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2262036>.

50. Sato M. Evaluation test of ALIS in Cambodia for humanitarian demining", Proc. SPIE 7664, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XV, 76641P (29 April 2010). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.849393>.

51. Baur J., Steinberg G., Nikulin A., Chiu K., de Smet T. S. Applying Deep Learning to Automate UAV-Based Detection of Scatterable Landmines. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12050859>.

52. Romero I., Walter T., Mariager S. Performance Analysis and Simulation of a Continuous Wave Metal Detector for UAV Applications. IGARSS 2022 – 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing

Symposium, Jul. 2022. P. 7222-7225. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9883102>.

53. Yoldemir B., Sezgin M. Peak scatter-based buried object identification using GPR-EMI dual sensor system. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2019. Vol. 34, no. 4. P. 339–353. DOI: <https://doi.org/10.1080/10589759.2019.1623213>.

54. Stepanić J., Wüstenberg H., Krstelj V., Mrasek H. Contribution to classification of buried objects based on acoustic impedance matching. *Ultrasonics*. 2003. Vol. 41, no. 2. P. 115-123. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(02\)00431-6](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00431-6).

55. Schultz G. M., Keranen J., Miller J. S., Shubitidze F. Acquisition and processing of advanced sensor data for ERW and UXO detection and classification. Proc. SPIE 9072, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIX, 90720H (9 June 2014). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2050876>.

56. Lebbad A., Clayton G., Nataraj C. Classification of UXO Using Convolutional Networks Trained on a Limited Dataset. 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Cancun, Mexico, 2017. P. 1098-1101. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMLA.2017.000-1>.

57. Baglio S., Cantelli L., Giusa F., Muscato G. Intelligent Prodder: Implementation of Measurement Methodologies for Material Recognition and Classification With Humanitarian Demining Applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Aug. 2015. Vol. 64, no. 8. P. 2217-2226. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2386917>.

58. Pantoja S. G. J. J., Ruiz E. F., González N., Vega F., Baeret C. Advances on the detection of Landmines and IEDs in Colombia using UWB GPR and Machine Learning Techniques. 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Dusseldorf, Germany, 2021. P. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.23919/EuCAP51087.2021.9411214>.

59. Killeen J., Jaupi L., Barrett B. Impact assessment of humanitarian demining using object-based peri-urban land cover classification and morphological building detection from VHR Worldview imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2022. Vol. 27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100766>.

60. Tivive F. H. C., Bouzerdoum A., Abeynayake C. Classification of Improvised Explosive Devices Using Multilevel Projective Dictionary Learning With Low-Rank Prior. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022. Vol. 60, no. 5110616. P. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3151335>.

61. Combrinck M. Transient electromagnetic exploration techniques: can they be applied to the landmine discrimination problem? *Journal of African Earth Sciences*. 2001. Vol. 33, no. 3–4. P. 693-698. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(01\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(01)00086-0).

62. Tbarki K., Said S. B., Ksantini R., Lachiri Z. One-class SVM for landmine detection and discrimination. International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), Hammamet, Tunisia, 2017. P. 309-313. DOI: <https://doi.org/10.1109/CADIAG.2017.8075676>.

63. Marc A., Verlinde P. Humanitarian demining: sensor design and signal processing aspects. In book: Detection of Explosives and Landmines. 2011. P.39-56. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-010-0397-1_4.

64. Kondo T., Kikuta K., Sato M. Ground Surface Reflection Compensation for Hand-Held GPR. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022. Vol. 19, no. 3501605. P. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3036671>.

Information about the authors:

Herasymchuk Liudmyla Oleksandrivna,

Candidate of Agricultural Sciences,
Associate Professor at the Department of Ecology
and Environmental Technologies
State University "Zhytomyr Polytechnic"
103, Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine

Valerko Ruslana Anatoliivna,

Candidate of Agricultural Sciences,
Associate Professor at the Department of Ecology
and Environmental Technologies
State University "Zhytomyr Polytechnic"
103, Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine

Patseva Iryna Hryhorivna,

Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Ecology and Environmental Technologies
State University "Zhytomyr Polytechnic"
103, Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine