

МОЖЛИВОСТІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ: РЕАЛІЇ УКРАЇНИ

Калашнікова Л. В.

ВСТУП

Війна нівечить й безжалісно руйнує не лише людські життя, а й завдає невивірених втрат природному середовищу. За попередніми оцінками фахівців обсяги кліматичних збитків внаслідок повномасштабної війни (2022-2025) сягнули близько 40 млрд євро¹, набувши не лише загальнонаціонального, а й глобального характеру.

Від початку воєнного вторгнення Росії на територію України низка міжнародних дослідницьких груп (зокрема, Conflict and Environmental Observatory, Zoi Environment Network та ін.) на постійних засадах проводять моніторинги зміни екологічної ситуації у зоні бойових дій та на прилеглих територіях, фіксуючи масштаби і наслідки завданої шкоди. Зокрема, за ініціативи ОБСЕ спільно з Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів створено інформаційну цифрову платформу «Екодозор»². Першочергово, йдеться про фіксацію випадків зниження якості повітря, забруднення ґрунтів й нестачу водних ресурсів, збільшення обсягів побутових і промислових відходів, руйнування екосистем, а також імовірність радіаційного забруднення тощо.

Як наголошує О. Овчінніков³, окремо слід говорити про активність волонтерських організацій та громадських об'єднань, які запустили ряд проєктів зі збору даних про екологічні лиха спричинені війною. З лютого 2022 р. Київська екологічна організація «Екодія» постійно оновлює дані інтерактивної мапи⁴ для фіксації явних/потенційних загроз екосистемі України та країнам, що з нею межують. На початку 2023 р. створено Раду реєстру наслідків руйнувань для України⁵, яка

¹ Climate Damage caused by Russia's war in Ukraine, 24 February 2022 – 23 February 2024. URL : <https://en.ecoaction.org.ua/climate-damageby-russia-24-months.html>.

² Ecodozor. Екологічні наслідки та ризики війни в Україні. URL : <https://ecodozor.org/>.

³ Овчінніков О. Екологічні наслідки війни Росії в Україні. Огляд за березень 2024 року. *Ukraine War Environmental Consequences Work Group*. 29 березня 2022. URL : <https://uwecworkgroup.info/uk/environmental-consequences-of-russias-war-in-ukraine-review-march-2024/>.

⁴ Потенційні екологічні наслідки російської агресії в Україні (інтерактивна карта). *Екодія*. URL : <https://en.ecoaction.org.ua/warmap.html>.

⁵ Register of Damage for Ukraine. *Official website*. URL : <https://rd4u.coe.int/en/home>.

має гарантом отримання компенсації з боку Росії за завдані під час війни екологічні збитки.

Традиційні методи моніторингу стану навколишнього середовища включають статистичний та лабораторний аналіз, ручний забір зразків ґрунту і води тощо. Ці методи мають низку обмежень таких, як трудомісткість, висока вартість, тривалість у часі, низька точність. Як правило, програми екологічного моніторингу мають вузьку спрямованість, невеликі вибірки даних та не дають повної картини щодо стану навколишнього середовища й можливих наслідків його погіршення у майбутньому. У зоні бойових дій і на прилеглих територіях здійснення діагностичних процедур фактично неможливе через високий рівень небезпеки. На жаль війна триває, тому щоденне оновлення даних, накопичення великого обсягу інформації, пов'язаної з екологією, детермінує потребу надійного їх зберігання та обробки. Відтак доречним є запровадження технологій штучного інтелекту (ШІ) як одного з напрямів інноваційної екологічної діяльності, що дозволить взаємодіяти зі складними екосистемами задля прогнозування змін, а також розробки стратегій управління ними.

Серед напрацювань, у межах яких досліджуються можливості ШІ у сфері екології, слід зазначити роботи групи дослідників на чолі з С. Субраманьям⁶, що порівняли методи ШІ із традиційними підходами моніторингу, наголошуючи на таких перевагах, як швидкість, вартість, масштабованість, можливість інтеграції даних, обслуговування та впливу на навколишнє середовище. Також І. Бідарі та С. Чікерур⁷ узагальнили можливості ШІ для аналізу супутникових зображень щодо вирубки лісів та ідентифікації ландшафтів дикої природи. Й. Лі, З. Фенг, С. Чен, З. Че^{8,9} та ін. розглядали перспективи використання ШІ для прогнозування появи загрози пожеж, лісових пожеж на основі узагальнення історичних даних й т. д. Аналогічних робіт дедалі більше з'являється й у вітчизняній

⁶ Subramaniam S., Raju N., Ganesan A., Rajavel N., Chenniappan M., Prakash C., Pramanik A., Basak A.K., Dixit S. Artificial Intelligence Technologies for Forecasting Air Pollution and Human Health: A Narrative Review. *Sustainability*. 2022. 14 (16). Pp. 9951. <https://doi.org/10.3390/su14169951>.

⁷ Bidari I., Chickerur S. Deep Recurrent Residual U-Net with Semi-Supervised Learning for Deforestation Change Detection. *SN Computer Science*. 2024. Vol. 5. Issue 7. Pp. 893. <https://doi.org/10.1007/s42979-024-03127-2>.

⁸ Li Y., Feng Z., Chen S., Zhao Z., Wang F. Application of the artificial neural network and support vector machines in forest fire prediction in the Guangxi autonomous region, China. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5612650>.

⁹ Che Z., Zhang C., Li W. et al. Fire danger forecasting using machine learning-based models and meteorological observation: a case study in Northeastern China. *Multimed Tools Appl*. 2024. Vol. 83. Pp. 61861–61881. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15881-1>.

науці, зокрема йдеться про наукові розвідки О. Кононова¹⁰, Л. Нечипорука, О. Кочергіної¹¹, С. Ставської¹², П. Мікави, Б. Яйлимова¹³, В. Марценюка, А. Жулкевича, А. Сверстюка, Н. Мельника, Н. Козодія, І. Березовської¹⁴, Е. Бондаренко, О. Яценко¹⁵, Ю. Сержантової, О. Марченка, І. Зеленчука¹⁶ та ін.

Як бачимо, актуалізація пошуку інноваційних підходів у процесі збору та аналізу геоінформаційних даних є надважливою для розв'язання екологічних проблем в умовах сьогодення. Особливо нагальним є використання технологій ШІ у зоні активних бойових задля збереження екосистем, забезпечення доступу до чистої води й повітря, а також відновлення знищених екологічних об'єктів.

1. Екологічні проблеми сьогодення

Екологічні проблеми від початку війни суттєво поглибилися і стали мати характер глобальних, через зростання тенденцій екоциду, у першу чергу, внаслідок прямої загрози застосування хімічної, біологічної та ядерної зброї, а також інших засобів масового знищення мирного українського населення, а також їх наслідків, що виходять далеко за межі України.

¹⁰ Кононов О. О. Використання штучного інтелекту в методах біоіндикації та моніторингу антропогенного навантаження на прикладі Chat GPT та MS Copilot. *Екологічні науки*. 2023. № 6 (51). С. 207–210. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.34>.

¹¹ Нечипорук Л., Кочергіна О. Вплив індустрії 5.0 на сталий розвиток економіки. *Цифрова економіка та економічна безпека*. 2024. № 5 (14). С. 27–32. <https://doi.org/10.32782/dees.14-4>.

¹² Ставська С. Потенціал використання штучного інтелекту у вирішенні проблем екології і водовикористання. *Матеріали XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство»* (м. Київ, Україна, 7 грудня 2023 р.). <https://doi.org/10.20535/ENS2710-3315.2023.292576>.

¹³ Мікава П. В., Яйлимов Б. Я. Методи машинного навчання для моніторингу навколишнього середовища. *Міжнародний науково-технічний журнал «Проблеми керування та інформатики»*. 2024. № 69 (2). С. 108–122. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2024-2-9>.

¹⁴ Марценюк В. П., Жулкевич А. С., Сверстюк А. С., Мельник Н. А., Козодій Н. В., Березовська І. Б. Використання біосенсорів для моніторингу навколишнього середовища. *Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України*. 2019. № 2. С. 107–114. <https://doi.org/10.11603/1681-2786.2019.2.10491>.

¹⁵ Бондаренко Е., Яценко О. ГІС у задачах моніторингу навколишнього середовища. *Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка. Географія*. 2020. Вип. 1–2. С. 95–100. <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2020.76-77.14>.

¹⁶ Сержантова Ю. Ю., Марченко О. І., Зеленчук І. Д. Використання новітніх технологій для моніторингу та збереження довкілля: роль дронів, супутників та штучного інтелекту. *Екологічні науки*. 2024. № 5 (56). С. 182–189. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.27>.

За офіційними даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів за період 2022–2025 рр. площа засмічених земель внаслідок війни та воєнних дій сягає 22,31 км², що становить 5% від загальної площі країни¹⁷. Проте це не остаточні цифри, оскільки слід говорити й про ґрунти і сільськогосподарські угіддя, а також об'єкти природно-заповідного фонду України, що отримали механічні ушкодження та хімічні забруднення. Також варто обговорювати проблеми деформації ґрунту внаслідок пересування важкої військової техніки, будівництва фортифікаційних споруд, бомбтурбації й інших вібраційних зсувів¹⁸.

Через чисельні вибухи серйозних втрат зазнав біологічний покрив – трав'яне укриття, мох, лишайники, гриби, з іншого боку, пари і хімічні сполуки, що утворюються після вибухів, викликають хімічні опіки рослин й насичують ґрунт залізом, вуглецем, сіркою, міддю й ураном¹⁹. Найбільше постраждали ґрунти у Донецькій (21213,6 км², що становить 80% загальної території області), Луганській (24015,6 км² – 90%), Херсонській (25776,9 км² – 90%), Миколаївській (3689,7 км² – 15%), Харківській (14136,8 км² – 45%), Сумській (19067,2 км² – 80%), Чернігівській (25492,0 км² – 80%) та Київській (5626,2 км² – 20%) областях²⁰.

За офіційними даними площа замінованих територій в Україні на сьогодні складає 139 тис. км², а це майже 23% від загальної її площа²¹. З метою убезпечення життя і здоров'я населення Державна служба України з надзвичайних ситуацій ініціювала створення мобільного додатку «MineFree» («Розмінування України») з інтерактивною мапою, на якій позначено небезпечні та підозрілі об'єкти²². За приблизними

¹⁷ Завдані збитки. Земельні ресурси. *ЕкоЗагроза*. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL : <https://ecozagroza.gov.ua/damage/shove>.

¹⁸ Голубцов О., Сорокіна Л., Сплодитель А., Чумаченко С. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу. Київ: ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія»», 2023. 32 с. URL : <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii-summary3.pdf>.

¹⁹ Василюк О., Колодежна В. Якою повинна бути доля пошкоджених вибухів українських територій? *Ukraine War Environmental Consequences Work Group*. 27 червня 2022. URL : <https://uwecworkgroup.info/uk/future-of-munitions-damaged-ukrainian-lands/>.

²⁰ Строкаль В. П., Бережнюк Є. М., Наумовська О. І., Вагалюк Л. В., Ладика М. М., Сербенюк Г. А., Паламарчук С. П., Павлюк С. Д. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України: монографія / За заг. ред. В. П. Строкаль. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2023. 218 с. URL : https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u341/monografiya-ostanniyn_variant_isbn_5.pdf.

²¹ Собенко Н., Галка Н. В Україні заміновано майже 139 тисяч кв. км території – Шмигаль. *Суспільне новини*. 2 грудня 2024. URL : <https://suspiilne.media/893279-v-ukraini-zaminovano-majze-139-tisac-kv-km-teritorii-smigal/>.

²² Про проект – MineFree. Будь пильним. Тримайся подалі від мін. URL : <https://www.minefree.info/about>.

розрахунками саперів знадобиться 77-757 років для того, щоб заміновані території стали знову придатними для життя²³.

За оцінками екологів, на тлі скорочення викидів від промислових об'єктів та транспорту суттєво зросли шкідливі викиди в атмосферне повітря через прямі (внаслідок чисельних вибухів авіабомб, ракет, масованих обстрілів артилерії) і непрямі (через пожежі, горіння нафтопродуктів, пошкодження газогонів) наслідки війни. Станом на початок 2025 р. загальні обсяги викидів в атмосферне повітря сягнули 65 млн тонн, у той час, як площа згорілих лісів та інших насаджень становить 85,4 тис. га²⁴. Окремо слід говорити про викиди вуглецю, чадного газу, сажі й оксидів азоту від дизельних та паливних генераторів, використання яких стало актуальним у часи блекаутів в країні, а також забруднення повітря внаслідок руйнування сховищ палива, промислових об'єктів, переміщення великого числа військової техніки й утворення пилу, викидів викопного палива та використання хімічної зброї (зокрема бомб з білим фосфором) тощо.

Відтак порівняння показників (КІЗА) у період 2014–2024 рр. демонструє зрушення рівня забруднення атмосферного повітря у зоні активних бойових дій та прифронтових регіонах (див. табл. 1)^{25, 26}.

Таблиця 1

Комплексний індекс забруднення атмосферного повітря міст України

Місто	2014	2024	Місто	2014	2024
Кам'янське	13,4	13,1	Миколаїв	9,2	5,8
Краматорськ	8,6	11,3	Кременчук	5,0	5,0
Кривий Ріг	8,9	10,5	Полтава	3,8	5,0
Дніпро	10,7	10,2	Кропивницький	4,8	4,8
Луцьк	7,5	8,7	Рівне	7,9	4,6
Одеса	14,1	8,7	Житомир	3,9	4,2

²³ Розмінування України. Українська асоціація гуманітарного розмінування : офіційний сайт. URL : <https://deminingua.com/rozminuvannya-ukrayini>.

²⁴ Завдані збитки. Атмосферне повітря. ЕкоЗагроза. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL : <https://ecozagroza.gov.ua/damage/air>.

²⁵ Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за I півріччя 2014 року за даними мережі спостережень Національної гідрометслужби України). URL : https://komekolog.rada.gov.ua/documents/good_info/good_info/analit_mater/73395.html.

²⁶ Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за I півріччя 2024 року (за даними мережі спостережень Національної гідрометслужби України). Київ : Центральна геофізична обсерваторія ім. Б. Срезневського, 2024. 19 с. URL : http://www.cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/images/%D0%9E%D0%93%D0%9B%D0%AF%D0%94_%D0%B7%D0%B0_%D0%86_%D0%BF%D1%96%D0%B2%D1%80%D1%96%D1%87%D1%87%D1%8F_2024.pdf.

Продовження таблиці 1

Херсон	8,2	8,2	Біла Церква	3,6	4,0
Запоріжжя	8,4	8,1	Тернопіль	3,6	4,0
Львів	5,6	8,0	Чернігів	2,6	3,7
Слов'янськ	11,0	7,8	Українка	2,8	3,7
Вінниця	3,8	7,8	Олександрія	3,3	3,6
Київ	9,0	7,1	Івано-Франківськ	3,2	3,4
Суми	5,0	6,9	Бровари	2,6	3,2
Черкаси	6,2	6,8	Харків	2,9	3,1
Ужгород	6,5	6,6	Ізмаїл	3,6	3,1

Особливе занепокоєння викликає забруднення водних ресурсів²⁷. Через активні військові дії лише за перший рік війни в Україні було пошкоджено 724 гідротехнічні споруди, 71 водонасосну станцію, 64 каналізаційних насосних станцій та 23 водоочисні споруди²⁸. За оцінками Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України загальна сума завданих збитків сягнула 104,31 млрд грн²⁹, переважно це пов'язано з підривом Ірпінської дамби, руйнуванням Каховського водосховища та пошкодженням Дніпрогесу. Ушкодження систем водопостачання призвело до зниження рівня підземних вод, пошкодження водосховищ і дамб, що, у свою чергу, спричиняє появу повеней, зміну водного режиму річок і призводить до скорочення запасів води для зрошення та постачання. Через внутрішню міграцію населення в окремих районах зростає споживання питної води, а відтак і необхідність управління водними ресурсами.

У світлі проблем, пов'язаних із забруднення водних ресурсів, окремої уваги потребує огляд наслідків скиду стічних вод і припинення роботи фільтраційних станцій, контроль за діяльністю яких неможливий через тимчасову окупацію територій (зокрема йдеться про Карлівську, Великоанадольську, Старокримську, Горлівську фільтраційні станції у Донецькій області, очисні споруди Васильківського каналу у Запорізькій області, каналізаційні споруди у с.Галіцинове Миколаївської області та ін.). Масштаби завданого лиха і наслідки від забруднення

²⁷ Коваленко О. І. Екологічні дослідження війни в Україні: науковий аналіз втрат, виклики та рекомендації. *Наука, технології, інновації*. 2024. № 4 (32). С. 54–61. <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2024-4-06>.

²⁸ The World Bank. Updated Ukraine recovery and reconstruction needs assessment. 2023. URL : <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2023/03/23/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment>.

²⁹ Завдані збитки. Водні ресурси. *ЕкоЗагроза. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України*. URL : <https://ecozagroza.gov.ua/damage/water>.

водойм через скидання до них неочищених січних вод особливо відбиваються для функціонування живих організмів водойм³⁰.

Руйнування енергетичної інфраструктури у Донецькій і Луганській областях, що живлять насосні станції й водоочисні споруди, може призвести до забруднення ґрунтових вод токсичними відходами, зокрема важкими металами, адже з підземних стволів та камер покинутих вугільних шахт треба постійно відкачувати воду, щоб не допустити їх затоплення³¹.

Потрапляння стічних вод до великих річок, зокрема Дніпра, Дністра, Південного Бугу та естуаріїв, що впадають в Азовське і Чорне моря, а також забруднення внаслідок атак портів, призводить до масштабування екологічних загроз для Туреччини, Грузії, Болгарії та Румунії. Найкритичнішою стала ситуація, пов'язана з обвалом дамби Нової Каховки на річці Дніпро спричинив масштабну повінь, яка винесла органічні відходи, міни, боєприпаси, сотні тон нафти у дельту Дніпра, а відтак і Чорне море.

Окремої уваги потребує вивчення радіоактивних небезпек. Йдеться, першочергово, про функціонування колишньої Чорнобильської АЕС та її забрудненої зони відчуження, а також Запорізької АЕС. Через постійні обстріли Чорнобильської АЕС є загроза ушкодження захисного саркофага й, як наслідок, витоку радіоактивних речовин. З моменту окупації російськими військами Запорізька АЕС неодноразово страждала від спорядичних обстрілів, збоїв зовнішнього електропостачання та загроз зриву водопостачання. Навіть у звичайних умовах зупинка реактора може спричинити серйозні аварії й поширення радіоактивного шлейфу за межі України³².

Ще однією проблемою екології є поява непрямих наслідків, зокрема пов'язаних з утилізацією та рекуперацією відходів. Йдеться про будівельні залишки руйнації, рештки ракет, бомб, набоїв, міни, військову техніку, що вийшла з ладу, побутові та медичні відходи, які накопи-

³⁰ Строкаль В. П., Бережний Є. М., Наумовська О. І., Вагалюк Л. В., Ладика М. М., Сербенюк Г. А., Паламарчук С. П., Павлюк С. Д. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України: монографія / За заг. ред. В. П. Строкаль. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2023. 218 с. URL : https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u341/monografiya-ostanniyn_variant_isbn_5.pdf.

³¹ Там само.

³² Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M., Kravchuk O. et al. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2024. Vol. 19. URL : <https://occup-med.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12995-023-00398-y>.

чуються як на санкціонованих, так і несанкціонованих сміттєзвалищах, а також стихійні поховання³³.

Перша проблема поводження із такого роду відходами пов'язана зі складністю їх сортування, адже безумовно воно має починатися з перевірки на наявність вибухових речовин та розмінування³⁴. Потім відбувається ручне чи механізоване розбирання завалів, а згодом сортування залишків конструкцій (цегла, бетон, кераміка, деревина, скло, металопластик, ізоляційні матеріали та азбестовмісні продукти), що придатні для повторного використання. Проте більшість таких відходів підлягає утилізації та захороненню. У межах реалізації пілотних проєктів за участі кампаній GreenMix, Neo-Eco частково ці проблеми вирішуються, але звісно цього недостатньо.

Друга проблема пов'язана з відсутністю фізичного доступу до господарчих об'єктів на окупованих територіях (як приклад, масовий мор птиці на птахофабриці «Чорнобаївська» у Херсонській області внаслідок знеструмлення, руйнування через масові обстріли, чисельні втрати великої рогатої худоби через окупацію ферми «ТОВ Харківський молочний комбінат» у Харківській області, ферми «Напорівське» у Чернігівській області та ін.)³⁵. Не менш важливим питанням в умовах воєнних дій є руйнація і підтоплення скотомогильників, особливо у Херсонській, Миколаївській та Одеській областях після підриву Каховської ГЕС.

Продуктування медичних відходів при наданні невідкладної домедичної допомоги відбувається за надзвичайно складних, навіть екстремальних умов, відтак збір і утилізація подекуди неможливі. Також на лінії фронту й у прифронтових регіонах фіксуються часті випадки стихійних поховань, які організовуються без належного дотримання санітарно-гігієнічних умов. Все це спричиняє поширення чисельних інфекційних захворювань, епідемій тощо.

Звісно цей перелік екологічних проблем можна продовжувати, проте говорячи про реальні масштаби й наслідки забруднення навколишнього середовища (грунтів, повітря, води) для населення України, зауважимо,

³³ Духневич А. В., Карпінська Н. В. Екологічні наслідки війни: оцінка впливу відходів на навколишнє середовище. *Аналітично-порівняльне правознавство*. 2025. № 1. С. 347–352. <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2025.01.55>.

³⁴ Ореханова Ю. Амбросова А., Таран К. Аналіз проблем переробки відходів від руйнувань: воєнний вимір. Кривий Ріг: ГС «Досить труїти Кривий Ріг», 2023. 32 с. URL : <https://dtkr.com.ua/wp-content/uploads/2023/07/analiz-problemi-vidhodi-rujnuvan.pdf>.

³⁵ Строкаль В. П., Бережнюк С. М., Наумовська О. І., Вагалюк Л. В., Ладика М. М., Сербенюк Г. А., Паламарчук С. П., Павлюк С. Д. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України: монографія / За заг. ред. В. П. Строкаль. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2023. С. 160–161. URL : https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u341/monografiya-ostanniyn_variant_isbn_5.pdf.

що вони можуть бути короткочасними або ж довготривалими, що залежить від періоду впливу, а також типів і концентрацій забруднюючих речовин. Більшість з них мають накопичувальний ефект, то ж комплексний аналіз негативних наслідків впливу забруднення повинен передбачати поряд зі статистикою основних показників екологічної безпеки відстеження динаміки показників здоров'я населення.

Узагальнюючи, зазначимо, що попереднє оцінювання шкоди і величини збитків, завданих навколишньому середовищу, включає порівняння довоєнних базових умов та оцінку змін у ресурсах, які ймовірно постраждали від військових дій. Таке оцінювання зосереджене переважно на матеріальних втратах, а не на повному впливі війни на функціонування і розвиток екосистеми. Натомість повне оцінювання впливу на навколишнє середовище буде можливим лише після закінчення війни. Дані, які використовуються в цій попередньому оцінюванні, включають письмові та візуальні записи загальнодоступних даних з Інтернету, дистанційне зондування з використанням супутникових і безпілотних технологій у реальному часі, інформацію з відкритих джерел, зібрану цивільними особами за допомогою фотографій і свідчень очевидців, а також відвідування місць із відбором проб навколишнього середовища, де і коли це можливо. На сьогодні українські державні установи, громадські організації та міжнародні партнери зібрили безпрецедентний обсяг даних про вплив війни на довкілля, які будуть покладені в основу розробки стратегії повоєнного відновлення, а також стануть доказовою базою для отримання репарацій.

2. Напрями використання ШІ для вирішення екологічних проблем

Сьогодні ШІ є надзвичайно важливою частиною моніторингу навколишнього середовища, що дозволяє підвищувати об'єктивність результатів і покращувати доступ до регіонів, які страждають від обмежених ресурсів. Аналізуючи великі набори даних за допомогою штучного інтелекту, фахівці у сфері екології й суміжних галузей знань отримують можливість виявлення закономірностей і створення точних прогнозів, включаючи прогнозування імовірності настання стихійних лих, моніторинг якості повітря та води, виявлення забруднюючих речовин та обсягів продукування відходів.

Група індійських дослідників С. Субраманьям, Н. Раджу, А. Ганесан, Н. Раджавел, М. Ченніпан, К. Пракаш, А. Праманік, А. К. Басак, С. Діксіт зазначили, на відміну від традиційних методів збору даних про стан навколишнього середовища, ШІ має низку переваг (табл. 2).

Таблиця 2

**Критерії порівняння функціональних можливостей ІІІ
і традиційних методів моніторингу навколишнього середовища**

Критерій порівняння	Традиційні методи	Методи ІІІ
Точність	Більшість заборів даних здійснюється вручну на малих вибірках, точність вимірювань залежить від досвіду фахівця, його суб'єктивної оцінки.	Нейронні мережі мають високу точність розпізнавання зображень і шаблонів, здатні опрацьовувати великі масиви даних, що зменшує похибки репрезентативності й суттєво підвищує точність вимірювань.
Швидкість	Збір даних займає багато часу, суттєво уповільнюється або взагалі неможливий в екстремальних умовах через високий рівень загрози житті і здоров'ю дослідників.	Обробка даних у режимі реального часу (TensorFlow, Keras), автоматизовані незалежні системи моніторингу (IBM Watson та інші IoT-технології).
Вартість	Початкове налаштування може бути дороговартісним (автоматизоване обладнання, програмне забезпечення, навчання), витрати на обслуговування суттєво нижчі за оплату людської праці.	Високі поточні вимірювання здорожують через необхідність закупівлі додаткового обладнання і оплати витратних матеріалів. Додатково оплачується навчання персоналу, сервісне обслуговування обладнання.
Масштабність	Хмарні платформи (Microsoft Azure, Google Cloud AI) легко масштабуються.	Обмежена масштабованість через залежність від людської праці та фізичного відбору проб, дороговартісна і складна логістика.
Інтеграція даних	Інструменти аналізу великих даних (Hadoop, Apache Spark) опрацьовують та інтегрують великі масиви різноманітних даних.	Повна/часткова неможливість міжгалузевої інтеграції окремих даних через відмінність методик збору та швидкість втрати актуальності, застарілість даних.

3-поміж напрямів використання ІІІ для моніторингу стану забруднення навколишнього середовища слід виокремити моніторинг повітря, води і ґрунтів. Використання датчиків (тиску, потоку, якості води, повітря й ґрунту, акустичні датчики та IoT-технології), а також даних дронів, супутникових знімків та інших джерел дозволяє виявлення та відстеження забруднення, оперативно реагувати на критичні ситуації та приймати ефективні заходи для їх усунення. Інтеграція з геопросторовою інформацією (GIS) уможливорює використання даних для більш точного визначення місцезнаходження

витоків забруднюючих речовин та оптимізації роботи системи по усуненню наслідків.

Взаємодія ІІІ з програмами SmartCity може рекомендувати зміни в моделях транспортних потоків, щоб зменшити затори та забруднення повітря, або зміни в міському плануванні, щоб покращити циркуляцію повітря та зменшити вплив забруднюючих речовин. Вистежуючи рух внутрішніх мігрантів і зміни навантаження на систему каналізаційного відведення і утворення відходів, ІІІ може спрогнозувати перебіг подій і запропонувати моделі вирішення проблемних ситуацій. У промислових умовах ІІІ може аналізувати дані про викиди та пропонувати модифікації для зниження рівнів забруднення, такі як використання більш екологічних матеріалів і джерел енергії або оптимізація виробничих процесів для мінімізації відходів і викидів³⁶.

Завдяки можливостям навчання ІІІ може вивчати дані про погоду, історичні записи щодо якості води, повітря, щоб побудувати моделі та тенденції, які можуть свідчити про зміни їх якості. Також ІІІ можна навчити розпізнавати незначні зміни якості води і повітря, такі як коливання температури, рН, рівні кисню та наявність забруднюючих речовин. Аналізуючи характеристики діяльності точкових забруднювачів ІІІ здатен передбачити майбутні зміни якості води і повітря. А відтак ІІІ, аналізуючи дані про погодні умови, геологічну активність та інші фактори здатен передбачати повені, зсуви, появу лісових пожеж та інших стихійних лих. Це дозволяє завчасно евакуювати населення та вжити необхідних заходів для мінімізації наслідків.

Моніторинг зміни кліматичних умов, метеорологічних показників, рівня якості повітря і води разом із даними про рівень захворюваності населення дозволяє локалізувати осередки загроз і ризиків для здоров'я, прогнозувати спалахи респіраторних, інфекційних та серцево-судинних захворювань. Відтак технології ІІІ можуть стати у пригоді в сфері надання медичних послуг і громадського здоров'я шляхом запобігання спалахам захворюваності та зменшення навантаження на систему охорони здоров'я.

Застосування ІІІ у моніторингу ґрунтів є значним прогресом в управлінні сільськогосподарською діяльністю. Зокрема йдеться про фіксацію показників вмісту вологи, рівня поживних речовин і рН. Аналізуючи зображення з супутників, дронів або безпілотних літальних апаратів, ІІІ здатен виявляти закономірності, пов'язані зі станом

³⁶ Olawade D. B., Wada O. Z., Ige A. O., Egbewole B. I., Olojo A., Oladapo B. I. Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions. *Hygiene and Environmental Health Advances*. 2024. Vol. 12. 100114. <https://doi.org/10.1016/j.heha.2024.100114>.

грунту, ерозією та забрудненням. Особливо це актуалізується для замінованих територій, зон звільнених від окупації чи тих, що межують з лінією бойового зіткнення, адже здатність легко досягати важкодоступних місць дозволяє здійснювати збір різноманітних даних про стан заданих екосистем. Так, дрони, оснащені мульти-спектральними та гіперспектральними камерами, роблять знімки ґрунту з високою роздільною здатністю, а алгоритми ШІ обробляють ці зображення, щоб оцінити стан ґрунту та виявити такі проблеми, як дефіцит поживних речовин або зараження шкідниками³⁷. Рекурентні нейронні мережі (RNN) використовуються для аналізу часових рядів ґрунтових даних, прогнозуючи зміни властивостей ґрунту з часом на основі історичних даних.

Послугуючись технологіями ШІ, можна оптимізувати використання ресурсів, оскільки новітні інформаційні технології застосовуються для оптимізації використання водних і енергетичних ресурсів в сільському господарстві, промисловості, та в побуті. Також важливо говорити про використання ШІ у процесі збору, сортування та переробки відходів, що сприятиме зменшенню обсягів захоронення відходів та збільшенню частки їх переробки. З одного боку, використання супутникових знімків дозволить фіксувати факти появи стихійних і несанкціонованих сміттєзвалищ, з іншого – встановлення датчиків на сміттєвих баках забезпечить автоматизовану перевірку правильності сортування відходів.

ВИСНОВКИ

Узагальнюючи, зазначимо, що використання ШІ у сфері екології передбачає реалізацію таких завдань, як: 1) розробка діагностичних центрів на основі моделі геоінформаційної системи з використанням робототехніки з елементами ШІ; 2) застосування інноваційних технологічних систем на основі ШІ для прийняття управлінських рішень з огляду на необхідність контролю перебігу процесів раціонального природокористування та проведення відновлювальних робіт без безпосередньої участі (рекультивация пошкоджених унаслідок бойових дій або виснажених унаслідок людської діяльності земель, нейтралізація забруднення акваторії водоймищ нафтопродуктами та хімічними викидами); 3) забезпечення оптимального функціонування створюваних складних інформаційних систем моніторингу з урахуванням специфіки воєнного та повоєнного станів. Реалізація означених стратегічних

³⁷ Сержантова Ю.Ю., Марченко О.І., Зеленчук І.Д. Використання новітніх технологій для моніторингу та збереження довкілля: роль дронів, супутників та штучного інтелекту. *Екологічні науки*. 2024. № 5 (56). С. 182–188.

завдань в Україні потребує системного підходу, що включає належне наукове, кадрове та матеріальне забезпечення використання ШІ. Для цього потрібна державна підтримка, а також широке залучення коштів приватного сектору й венчурного капіталу³⁸.

Послугуючись технологіями ШІ, можна суттєво підвищити якість моніторингу довкілля та оперативність екологічного управління. З-поміж наявних переваг використання ШІ: охоплення великих територій, точність аналізу, своєчасність виявлення змін та запобігання негативним екологічним наслідкам, повна комплексна оцінка за рахунок інтеграції даних про життєві цикли екосистем з оперативною і локальною інформацією, що сприяє покращенню екологічної ситуації та сталому розвитку. Варто зазначити, що ШІ не лише суттєво покращить існуючі програми моніторингу рівня забруднення навколишнього середовища, а навіть замінить їх у майбутньому.

Здатність ШІ забезпечувати створення точних прогнозів та здійснення моніторингу у реальному часі підвищує ефективність і дієвість практики управління навколишнім середовищем. Однак дуже важливо визнати потенційні перешкоди на шляху розгортання технологій ШІ. У першу чергу, йдеться про воєнні умови і відтермінування повноцінного використання ШІ для оцінювання збитків екосистемі України, участі у розмінуванні територій та моніторингу забруднення, спричиненого бойовими діями. З іншого боку, впровадження технологій ШІ вимагає значних фінансових та технічних ресурсів, адже сьогодні Україні бракує інвестицій та міжнародної допомоги для розвитку ШІ-технологій, зокрема в екологічній сфері. Також для ефективного застосування ШІ необхідна розвинена інфраструктура, включаючи мережі датчиків, центри обробки даних та кваліфіковані кадри, дефіцит яких, особливо у секторі навколишнього середовища, створює ще одну проблему для повноцінного використання потенціалу ШІ.

Ще одна проблема пов'язана з необхідністю вирішити питання щодо доступу до даних, контролю та конфіденційності задля запобігання використанню ШІ для маніпулювання громадськістю через надмірну увагу до прогнозування стихійних лих. З іншого боку, слід сприяти відкритості даних у суміжних сферах з метою їх обміну. Надійні структури управління даними є важливими для пом'якшення цих ризиків і забезпечення справедливого та етичного використання технологій ШІ. У цьому сенсі необхідно створювати законодавчі та

³⁸ Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні: монографія / за заг. ред. А. І. Шевченка. Київ: Інститут проблем штучного інтелекту, 2023. 305 с. URL : https://jai.in.ua/archive/2023/ai_mono.pdf.

регуляторні бар'єри, зокрема розробити сприятливе законодавче середовище для впровадження ШІ-технологій в екологічній сфері.

Незважаючи на ці виклики, ШІ має великий потенціал для покращення екологічної ситуації в Україні. Важливо розробляти та впроваджувати ШІ-технології з урахуванням українських реалій та залучати до цього процесу науковців, бізнес та громадськість.

АНОТАЦІЯ

Катастрофічні екологічні наслідки повномасштабної війни в Україні оцінюються завданими збитками у понад 40 млрд євро. Вкрай важливими є Зусилля міжнародних та українських організацій, таких як Conflict and Environmental Observatory, Zoi Environment Network та «Екодозор», у моніторингу та фіксації екологічної шкоди, що охоплює забруднення повітря, ґрунтів, нестачу водних ресурсів, накопичення відходів, руйнування екосистем та радіаційну небезпеку. Недостатність традиційних методів моніторингу в умовах бойових дій через їхню трудомісткість, високу вартість, низьку точність та неможливість доступу до небезпечних зон обґрунтовує нагальну потребу впровадження технологій ШІ в екологічну діяльність. Особливо важливим є використання потенціалу ШІ у створенні діагностичних центрів, розробці інноваційних систем для прийняття управлінських рішень та забезпеченні функціонування моніторингових систем у воєнний та повоєнний періоди.

Література

1. Climate Damage caused by Russia's war in Ukraine, 24 February 2022 – 23 February 2024. URL: <https://en.ecoaction.org.ua/climate-damageby-russia-24-months.html>.

2. Ecodozor. Екологічні наслідки та ризики війни в Україні. URL: <https://ecodozor.org/>.

3. Овчінников О. Екологічні наслідки війни Росії в Україні. Огляд за березень 2024 року. *Ukraine War Environmental Consequences Work Group*. 29 березня 2022. URL: <https://uwecworkgroup.info/uk/environmental-consequences-of-russias-war-in-ukraine-review-march-2024/>.

4. Потенційні екологічні наслідки російської агресії в Україні (інтерактивна карта). *Екодія*. URL: <https://en.ecoaction.org.ua/warmap.html>.

5. Register of Damage for Ukraine. *Official website*. URL: <https://rd4u.coe.int/en/home>.

6. Subramaniam S., Raju N., Ganesan A., Rajavel N., Chenniappan M., Prakash C., Pramanik A., Basak A.K., Dixit S. Artificial Intelligence

Technologies for Forecasting Air Pollution and Human Health: A Narrative Review. *Sustainability*. 2022. 14 (16). Pp. 9951. <https://doi.org/10.3390/su14169951>.

7. Bidari I., Chickerur S. Deep Recurrent Residual U-Net with Semi-Supervised Learning for Deforestation Change Detection. *SN Computer Science*. 2024. Vol. 5. Issue 7. Pp. 893. <https://doi.org/10.1007/s42979-024-03127-2>.

8. Li Y., Feng Z., Chen S., Zhao Z., Wang F. Application of the artificial neural network and support vector machines in forest fire prediction in the Guangxi autonomous region, China. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5612650>.

9. Che Z., Zhang C., Li W. et al. Fire danger forecasting using machine learning-based models and meteorological observation: a case study in Northeastern China. *Multimed Tools Appl*. 2024. Vol. 83. Pp. 61861–61881. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15881-1>.

10. Кононов О. О. Використання штучного інтелекту в методах біоіндикації та моніторингу антропогенного навантаження на прикладі Chat GPT та MS Copilot. *Екологічні науки*. 2023. № 6 (51). С. 207–210. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.34>.

11. Нечипорук Л., Кочергіна О. Вплив індустрії 5.0 на сталий розвиток економіки. *Цифрова економіка та економічна безпека*. 2024. № 5 (14). С. 27–32. <https://doi.org/10.32782/dees.14-4>.

12. Ставська С. Потенціал використання штучного інтелекту у вирішенні проблем екології і водовикористання. *Матеріали XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство»* (м. Київ, Україна, 7 грудня 2023 р.). <https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2023.292576>.

13. Мікава П. В., Яйлимов Б. Я. Методи машинного навчання для моніторингу навколишнього середовища. *Міжнародний науково-технічний журнал «Проблеми керування та інформатики»*. 2024. № 69 (2). С. 108–122. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2024-2-9>.

14. Марценюк В. П., Жулкевич А. С., Сверстюк А. С., Мельник Н. А., Козодій Н. В., Березовська І. Б. Використання біосенсорів для моніторингу навколишнього середовища. *Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України*. 2019. № 2. С. 107–114. <https://doi.org/10.11603/1681-2786.2019.2.10491>.

15. Бондаренко Е., Яценко О. ГІС у задачах моніторингу навколишнього середовища. *Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка. Географія*. 2020. Вип. 1–2. С. 95–100. <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2020.76-77.14>.

16. Сержантова Ю. Ю., Марченко О. І., Зеленчук І. Д. Використання новітніх технологій для моніторингу та збереження довкілля: роль дронів, супутників та штучного інтелекту. *Екологічні науки*. 2024. № 5 (56). С. 182–189. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.27>.

17. Завдані збитки. Земельні ресурси. *ЕкоЗагроза*. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://ecozagroza.gov.ua/damage/shove>.

18. Голубцов О., Сорокіна Л., Сплодитель А., Чумаченко С. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу. Київ: ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія»», 2023. 32 с. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii-summary3.pdf>.

19. Василюк О., Колодежна В. Якою повинна бути доля пошкоджених вибухів українських територій? *Ukraine War Environmental Consequences Work Group*. 27 червня 2022. URL: <https://uwecworkgroup.info/uk/future-of-munitions-damaged-ukrainian-lands/>.

20. Строкаль В. П., Бережнюк Є. М., Наумовська О. І., Вагалюк Л. В., Ладика М. М., Сербенюк Г. А., Паламарчук С. П., Павлюк С. Д. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України: монографія / За заг. ред. В. П. Строкаль. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2023. 218 с. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u341/monografiya-ostanniy_variant_isbn_5.pdf.

21. Собенко Н., Галка Н. В Україні заміновано майже 139 тисяч кв. км території – Шмигаль. *Суспільне новини*. 2 грудня 2024. URL: <https://suspilne.media/893279-v-ukraini-zaminovano-majze-139-tisac-kv-km-teritorii-smigal/>.

22. Про проект – MineFree. Будь пильним. Тримайся подалі від мін. URL: <https://www.minefree.info/about>.

23. Розмінування України. *Українська асоціація гуманітарного розмінування* : офіційний сайт. URL: <https://deminingua.com/rozminuvannya-ukrayini>.

24. Завдані збитки. Атмосферне повітря. *ЕкоЗагроза*. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://ecozagroza.gov.ua/damage/air>.

25. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за I півріччя 2014 року за даними мережі спостережень Національної гідрометслужби України). URL: https://komekolog.rada.gov.ua/documents/good_info/good_info/analit_mater/73395.html.

26. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за I півріччя 2024 року (за даними мережі спостережень Національної гідрометслужби України). Київ : Центральна геофізична обсерваторія ім. Б. Срезневського, 2024. 19 с. URL: http://www.cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/images/%D0%9E%D0%93%D0%9B%D0%AF%D0%94_%D0%B7%D0%B0_%D0%86_%D0%BF%D1%96%D0%B2%D1%80%D1%96%D1%87%D1%87%D1%8F_2024.pdf.

27. Коваленко О. І. Екологічні дослідження війни в Україні: науковий аналіз втрат, виклики та рекомендації. *Наука, технології, інновації*. 2024. № 4 (32). С. 54–61. <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2024-4-06>.

28. The World Bank. Updated Ukraine recovery and reconstruction needs assessment. 2023. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2023/03/23/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment>.

29. Завдані збитки. Водні ресурси. *ЕкоЗагроза*. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://ecozagroza.gov.ua/damage/water>.

30. Строкаль В. П., Бережняк Є. М., Наумовська О. І., Вагалюк Л. В., Ладика М. М., Сербенюк Г. А., Паламарчук С. П., Павлюк С. Д. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України : монографія / За заг. ред. В. П. Строкаль. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2023. 218 с. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u341/monografiya-ostanniy_variant_isbn_5.pdf.

31. Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M., Kravchuk O. et al. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2024. Vol. 19. URL: <https://occup-med.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12995-023-00398-y>.

32. Духневич А. В., Карпінська Н. В. Екологічні наслідки війни: оцінка впливу відходів на навколишнє середовище. *Аналітично-порівняльне правознавство*. 2025. № 1. С. 347–352. <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2025.01.55>.

33. Ореханова Ю. Амбросова А., Таран К. Аналіз проблем переробки відходів від руйнувань: воєнний вимір. Кривий Ріг: ГС «Досить труїти Кривий Ріг», 2023. 32 с. URL: <https://dtkr.com.ua/wp-content/uploads/2023/07/analiz-problemi-vidhodi-rujnuvan.pdf>.

34. Строкаль В. П., Бережняк Є. М., Наумовська О. І., Вагалюк Л. В., Ладика М. М., Сербенюк Г. А., Паламарчук С. П., Павлюк С. Д. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України: монографія / За заг. ред. В. П. Строкаль. Київ : Видавничий центр

НУБіП України, 2023. С. 160–161. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u341/monografiya-ostanniy_variant_isbn_5.pdf.

35. Olawade D. B., Wada O. Z., Ige A. O., Egbewole B. I., Olojo A., Oladapo B. I. Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions. *Hygiene and Environmental Health Advances*. 2024. Vol. 12. 100114. <https://doi.org/10.1016/j.heha.2024.100114>.

36. Сержантова Ю. Ю., Марченко О. І., Зеленчук І. Д. Використання новітніх технологій для моніторингу та збереження довкілля: роль дронів, супутників та штучного інтелекту. *Екологічні науки*. 2024. № 5 (56). С. 182–188.

37. Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні: монографія / за заг. ред. А. І. Шевченка. Київ : Інститут проблем штучного інтелекту, 2023. 305 с. URL: https://jai.in.ua/archive/2023/ai_mono.pdf.

Information about the authors:

Kalashnikova Liudmyla Volodymyrivna

Doctor of Sociology, Professor, Department of Sociology
and Mass Communications,

Kyryvyi Rih State Pedagogical University,
Universitates Ave. 54, Kryvyi Rih, 50000, Ukraine