

ISSN 2518-7325 (Online), ISSN 2306-1677 (Print)

Землеустрій, кадастр і моніторинг земель

Отримано: 15.09.2026; Прийнято: 15.10.2026; Опубліковано: 30.06.2026;

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.02.06>

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

УДК 504.5:355.4:623.746-519

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВОЄННИХ ДІЙ: АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ ЗАЛИШКАМИ БОЄПРИПАСІВ, РУЙНУВАННЯМ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА УЛАМКАМИ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ

О. Кемпа, доктор технічних наук, старший викладач

Email: olgierd.kempa@upwr.edu.pl

ORCID: 0000-0002-5153-2010

Вроцлавський природничий університет

Ж. Вирва, магістр інженерних наук, асистент

Email: joanna.wyrwa@upwr.edu.pl

ORCID: 0000-0002-2540-8999

Вроцлавський природничий університет

А. Кошель, доктор економічних наук, професор

Email: koshel_a@nubip.edu.ua

ORCID: 0000-0001-9032-1622

Національний університет біоресурсів і природокористування України

М. Кемпа, студент

Email: 131984@student.upwr.edu.pl

ORCID: 0009-0000-6084-9338

Вроцлавський природничий університет

А. Розак, магістр інженерних наук, директор

Email: angeo@onet.pl

Анотація. Збройні конфлікти залишають у довкіллі тривалий слід. Вони змінюють територію і залишають матеріали, присутність яких не припиняється разом із бойовими діями. Метою цієї роботи є впорядкування таких залишків. Прийнято чотири основні критерії: джерело, місце поширення, механізм впливу та властивості матеріалу. Використано результати досліджень колишніх полів битв, військових територій і районів сучасних конфліктів. Розглянуто залишки боєприпасів, метали, енергетичні матеріали, хімічні речовини, радіонукліди, паливо, технічні відходи та стійкі зміни поверхні території. Приклади з Франції, Бельгії, В'єтнаму, Косова, регіону Перської затоки та України показують, що екологічний тиск може виникати по-різному. Він може з'являтися в місці застосування зброї, у місці знищення техніки, під час подальшого поводження із залишками або внаслідок змін у використанні простору. У цьому ширшому контексті безпілотні системи запропоновано розглядати як новий об'єкт дослідження технічних залишків. Їхня конструкція є багатоматеріальною. Вона охоплює метали, полімери, композити, електроніку та джерела енергії. У частині FPV-систем також застосовуються оптоволоконні кабелі. Після втрати платформи вони можуть залишати на місцевості лінійний слід. Поки що невідомі масштаби цього явища та його екологічні наслідки. Наявні дані не дають змоги порівняти ці залишки з добре дослідженими залишками боєприпасів. Тому стаття має насамперед систематизувальний та ідентифікаційний характер. Вона визначає напрями подальших досліджень: просторову інвентаризацію, матеріальну ідентифікацію, оцінку деградації та міграції, а також дослідження можливого впливу на ґрунт, воду, рослинність і фауну.

Ключові слова: збройний конфлікт, екологічний тиск, воєнні залишки, забруднення ґрунтів, безпілотні системи, геоінформація.

Актуальність

Війна спричиняє соціальні, матеріальні та екологічні збитки. У цій роботі не розглядаються наслідки для здоров'я та життя людей. Нас цікавить природне довкілля та матеріальний слід воєнних дій, який залишається у просторі після їх завершення.

Бойові дії припиняються, а те, що вони залишили на місцевості, нікуди не зникає. Дослідження колишніх полів битв показують, що вирви, метали з уламків боєприпасів, енергетичні сполуки та продукти знищення хімічних снарядів можуть зберігатися в ґрунті десятиліттями (Certini et al., 2013; Broomandi et al., 2020). Через сто років після Першої світової війни у лісових ґрунтах Франції все ще помітні відмінності в їхньому розвитку та підвищений вміст міді й свинцю (Williams & Rintoul-Hynes, 2022). Для таких територій добре відомо, чим вони забруднені і як ці забруднювачі поведуться в різних умовах.

Нині ця картина ускладнюється. Російсько-українська війна стала першим великим конфліктом, де безпілотні системи відіграють провідну роль, і їх використовують у дуже великих кількостях. Значна частина цих платформ є одноразовою: після виконання завдання вона розбивається або залишається на місцевості. Дрон містить метали, полімери, композити, електроніку та акумулятори (Negi et al., 2025), тобто за складом він помітно відрізняється від снаряда чи міни. Частина FPV-систем керується через оптоволоконний кабель, який розмотується під час польоту (Tytarenko et al., 2025). Після втрати платформи кабель може лишитися на місцевості лінійним об'єктом, для якого немає аналогів серед класичних воєнних залишків.

Науково ця проблема майже не опрацьована. Українські дослідження вже документують руйнування ґрунтів, вирви та зміни землекористування (Solokha et al., 2023, 2024; Bonchkovskyi et al., 2025; Domashenko et al., 2025), але вони зосереджені переважно на наслідках застосування боєприпасів. Залишки безпілотних систем, їхня кількість, просторове розміщення, швидкість деградації та вплив на довкілля у цих роботах окремо не розглядаються. Ми не маємо ні польових вимірювань, ні усталеної термінології, ні уявлення про те, чи йдеться про суттєве явище, чи про другорядне. Інвентаризувати та вивчати такі залишки

неможливо, доки не зрозуміло, до якої категорії їх відносити і за якими ознаками описувати.

Тому потреба в систематизації постає раніше, ніж потреба у вимірюваннях. Стаття не стверджує, що залишки безпілотних систем утворюють доведений клас забруднення. Вона вміщує їх у ширшу систематику воєнних залишків, чітко відокремлює відомі факти від гіпотез і визначає, що саме варто перевіряти далі. Для України, де відбудова та екологічне оцінювання територій тільки починаються, таке впорядкування допоможе ще на ранньому етапі закласти правильну основу для просторової інвентаризації та польових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Що стосується безпілотних систем, то їхня будова та багатоматеріальний характер добре описані (Balestrieri et al., 2021; Negi et al., 2025; Hashim, 2025). Також задокументовано використання волоконно-оптичних каналів зв'язку в деяких системах FPV (Tytarenko et al., 2025). Однак досі бракує достатніх даних щодо кількості залишків БПЛА, що залишаються після військових дій, їхнього розміщення, темпів деградації та впливу на конкретні екосистеми. Це зумовлено насамперед періодом, у який безпілотні системи почали відігравати провідну роль на полі бою. Він, по суті, обмежується конфліктом між Росією та Україною, що триває досі, що суттєво впливає на можливості отримання безпосередніх польових даних.

Тому в роботі не наводиться частка залишків БПЛА у загальній масі військових залишків. Також не визначається універсальний час розпаду дрона чи кабелю. Без емпіричних даних конкретним матеріалам не приписуються певні токсикологічні наслідки. Такі обмеження необхідні, щоб не змішувати технічну інформацію, механістичну гіпотезу та екологічний результат.

Ця стаття є першим етапом дослідницької програми. Її завданням є визначення проблеми та систематизація попередніх знань. Наступні роботи повинні перейти від ідентифікації до кількісних вимірювань та оцінки

механізмів. Таке розділення етапів зменшує ризик виведення висновків, які не обґрунтовані наявними даними.

Мета і завдання дослідження

Метою статті є впорядкування знань про екологічні наслідки воєн на основі попередніх досліджень. Друга мета – показати, яке місце в цій сукупності займають безпілотні системи. Особливу увагу приділено класифікації залишків та їхнім просторовим характеристикам. Безпілотні системи розглядаються як пропозиція нового об'єкта дослідження. Ми не стверджуємо, що вони вже утворюють доведену, окрему категорію забруднення.

Матеріали і методи дослідження

Робота має оглядовий характер. Використано наукові публікації про екологічні наслідки конфліктів, забруднення ґрунтів, залишки боєприпасів, енергетичні матеріали, хімічну зброю та радіонукліди. Додатково використано публікації про безпілотні системи, їх класифікацію, будову та конструкційні матеріали.

Приклади добиралися насамперед так, щоб їх можна було порівнювати. Для польових досліджень враховували місце та час отримання даних, якщо публікація подавала ці відомості однозначно. Результати вимірювань відокремлювали від механістичних інтерпретацій. Щодо безпілотних систем прийнято ще одне обмеження: інформація про будову пристроїв не розглядається як доказ наявності конкретного забруднювача в довкіллі.

Аналіз ґрунтувався на чотирьох елементах. Перший – джерело залишку. Другий – місце, де він трапляється. Третій охоплює механізм впливу. Четвертий стосується стійкості та можливості перенесення. Такий підхід дає змогу зіставити класичні воєнні залишки з матеріалами, що залишаються після сучасних технічних систем.

Результати дослідження

Екологічний запис конфлікту має два основні виміри. Перший — це зміни властивостей довкілля. До них належать деградація ґрунту, втрата рослинності, зміни водного режиму та перетворення рельєфу. Другий вимір утворюють матеріальні залишки. Це, зокрема, елементи боєприпасів, метали, вибухові матеріали, паливо, частини транспортних засобів та інфраструктури, а також відходи, що виникають під час воєнних дій. Обидві групи часто трапляються разом. Вони також можуть взаємодіяти між собою (Certini et al., 2013; Broomandi et al., 2020).

Екологічне значення залишків залежить від їхнього складу, форми та місця розташування. Важливі також умови навколишнього середовища. Той самий матеріал може поводитися по-різному в різних ґрунтах і за різного стану вод. Сама наявність об'єкта ще не дає відповіді на питання про його вплив. Потрібно відокремлювати джерело від залишку, а також шлях переміщення від компонента довкілля, який може зазнати впливу.

Розвиток військової техніки також змінював характер матеріалів, що залишаються після її застосування. Індустріалізація війни підвищила значення артилерійських боєприпасів, палива та хімічних речовин. У ХХ столітті додалися радіонукліди та хімічні засоби, що застосовувалися у великих масштабах. Сучасні військові системи, своєю чергою, містять дедалі більше електроніки, композитів, полімерів та енергетичних систем. Саме по собі це не означає появи нового класу забруднення. Однак це є підставою шукати нові категорії залишків і перевіряти, чи потребують вони інших методів виявлення.

Систематика екологічних воєнних залишків

Єдиної загальноприйнятої класифікації екологічних наслідків війни немає. Certini et al. (2013) поділяють впливи на ґрунт на фізичні, хімічні та біологічні. Broomandi et al. (2020) зосереджуються на забрудненні, пов'язаному з військовою діяльністю, та на групах речовин, присутніх у довкіллі. У цій роботі обидва підходи використано як вихідну основу для власного впорядкування матеріалу.

Прийнято два незалежні критерії. Перший відповідає на питання, де і в якій формі залишається слід конфлікту. Другий описує спосіб виникнення тиску на довкілля. Критерії можуть перетинатися. Той самий об'єкт може належати до кількох класів, якщо поєднує різні механізми впливу.

За першою віссю виділено чотири групи: залишки засобів ураження, залишки безпосередньої фронтової зони, залишки військової техніки та залишки позафронтових територій.

Залишки засобів ураження – це, зокрема, уламки снарядів, конструкційні елементи, енергетичні матеріали, нерозірвані боєприпаси та ґрунт, переміщений під час детонації. Вирва після вибуху одночасно є геоморфологічним об'єктом і записом дії засобу ураження. Вона змінює локальну форму поверхні. Також може впливати на інфільтрацію, стік води та ерозію.

Безпосередня фронтowa зона охоплює окопи, позиції, укріплення, тунелі, укриття та польові дороги. До цієї групи належать також побутові відходи та інші залишки, залишені в місцях тривалого перебування військ. Видалення рослинності, ущільнення ґрунту та переміщення матеріалу є тут фізичними наслідками. Зміни фауни та флори слід розглядати як наслідок впливу, а не як матеріальні залишки.

Залишки військової техніки охоплюють уламки транспортних засобів, елементи рушійної системи, металеві частини, пластмаси, гуму та скло. До них належать також паливо, оливи, експлуатаційні рідини, акумулятори та електроніка. Сучасні безпілотні системи є новим, особливим представником цієї групи. Їх значення для подальших досліджень визначається передусім кількістю компонентів і різноманітністю матеріалів.

Позафронтові території охоплюють місця бомбардування тилу, зруйновану промислову та енергетичну інфраструктуру, склади, транспортні мережі й комунальні об'єкти. Тут можна також враховувати зміни землекористування, пов'язані з переміщенням і концентрацією населення. Екологічний тиск може тому виникати далеко від місця безпосередніх бойових дій.

Друга вісь упорядковує механізми виникнення тиску на довкілля. Конвенційні дії призводять до детонації, утворення вирв, подрібнення боєприпасів, переміщення ґрунту та виникнення завалів. Хімічні дії охоплюють як навмисне застосування речовин, так і їх подальше вивільнення під час зберігання, спалювання або утилізації. Радіоактивні матеріали потребують окремого розгляду через свої фізичні властивості. Опосередковані впливи охоплюють зміни землекористування, гідрології та функціонування екосистем.

Такий поділ допомагає не плутати джерело з наслідком. Розбитий транспортний засіб є технічним залишком. Паливо, що витекло з його бака, є джерелом потенційного хімічного тиску. Зміна концентрації речовини в ґрунті вже є спостережуваним наслідком. Такий самий порядок слід зберігати під час аналізу залишків безпілотних систем.

Залишки боєприпасів і фізичні перетворення території

Залишки боєприпасів належать до найкраще досліджених екологічних воєнних залишків. Broomandi et al. (2020) вказують на наявність металів та енергетичних сполук на територіях, пов'язаних із військовою діяльністю. Certini et al. (2013) також звертають увагу на утворення вирв, траншей, ущільнення та переміщення ґрунту.

Перша світова війна дала багатий матеріал для порівнянь. Передусім через масштаб застосування артилерії. Bausinger et al. (2007) досліджували наслідки післявоєнного знищення хімічних боєприпасів у районі Вердена у Франції. Після війни цю територію використовували для спалювання снарядів, що містили сполуки миш'яку. У верхньому шарі ґрунту виявлено високі концентрації миш'яку та металів. Це показує, що саме поводження із залишками може стати вторинним джерелом забруднення.

Thouin et al. (2016) досліджували мобільність миш'яку та важких металів у ґрунті району Place-à-Gaz у лісі Спінкур, приблизно за 20 км на північний схід від Вердена. Територія була пов'язана з післявоєнним знищенням снарядів, що містили сполуки миш'яку. Результати підтвердили значення властивостей

грунту для переміщення забруднювачів. Це важливо і для інших залишків. Сам факт, що матеріал лежить на поверхні ґрунту, ще не показує, наскільки далеко він може переміститися.

Williams і Rintoul-Hynes (2022) аналізували ґрунти в лісах департаменту Пад-де-Кале у Франції, на території, що зазнала обстрілів під час Першої світової війни. Дослідження виконано приблизно через сто років після завершення бойових дій. Виявлено відмінності у розвитку ґрунтів, пов'язані з наявністю вив. Водночас істотних відмінностей у концентраціях важких металів між виврами та рівними ділянками не встановлено. Одночасно спостерігалось збагачення Cu і Pb порівняно з фоновими значеннями регіону. Результат добре показує, наскільки сильно місцеві умови можуть змінювати картину воєнних залишків.

Van Meirvenne et al. (2008) досліджували можливість локалізації металевих залишків на колишніх фронтових територіях Бельгії. Для цієї роботи важливе поєднання двох питань: об'єкта, що залишається в ґрунті, та способу його просторового виявлення. Історичні воєнні залишки можуть тому одночасно бути екологічною і геопросторовою проблемою.

Хімічні джерела екологічного тиску

Хімічний тиск, пов'язаний із війною, має щонайменше два джерела. Перше – безпосереднє застосування хімічних речовин. Друге – пізніше вивільнення речовин, що містяться в боєприпасах, складах, промислових установках та інфраструктурі. У другому випадку проблема може виникнути лише після завершення бойових дій.

Bausinger et al. (2007) показали цей механізм на прикладі місця спалювання хімічних боєприпасів у районі Вердена. Результати свідчать, що спосіб поводження із залишками може мати значення, подібне до самого факту їх залишення. Це безпосередньо важливо для оцінки післявоєнних заходів і рекультивації.

В'єтнам показав інший вид тиску. У 1961–1971 роках проводилася операція Ranch Hand. З повітря розпилювали гербіциди, щоб обмежити рослинний покрив. Stellman et al. (2003) опрацювали переглянуті дані щодо масштабів і просторового розподілу розпилень. Аналіз охоплював В'єтнам, а також дані щодо Лаосу та Камбоджі. Цей випадок показує, що військові дії можуть навмисно змінювати рослинність на дуже великій території.

Знищення інфраструктури може створювати нові, вторинні джерела забруднення. Пожежі на промислових підприємствах, складах та енергетичних об'єктах можуть вивільняти матеріали, що перебували всередині цих об'єктів. Certini et al. (2013) і Broomandi et al. (2020) відносять такі процеси до фізичних та хімічних наслідків військової діяльності. У сучасних конфліктах значення цього механізму може бути великим через кількість речовин, накопичених в інфраструктурі.

Радіоактивні матеріали як приклад специфічного залишку

Радіоактивні матеріали утворюють особливу групу залишків. Їхня специфіка визначається, зокрема, можливістю встановлення джерела за ізотопними властивостями та тривалим збереженням частини радіонуклідів. Приклади Хіросіми та Нагасакі показують, що під час інтерпретації сучасної наявності радіонуклідів потрібно розрізняти глобальні випадіння від матеріалу, безпосередньо пов'язаного із застосуванням засобом.

Yamamoto et al. (1985) аналізували Pu, ^{241}Am та ^{137}Cs у ґрунтах Хіросіми та Нагасакі. Зразки походили з територій, пов'язаних із бомбардуваннями 6 та 9 серпня 1945 року. У районі Нісіяма в Нагасакі ізотопні співвідношення вказували на істотну частку плутонію, що походив із бомби. У Хіросімі інтерпретація була складнішою. Цей приклад добре показує, що самого виявлення радіонукліда недостатньо. Важливо також встановити його походження.

Під час війни в Перській затоці діяв інший механізм. Bem і Bou-Rabee (2004) аналізували екологічні наслідки застосування збідненого урану. Огляд охоплював дані з Кувейту та південного Іраку, зокрема вимірювання 1992–1994

років. Автори розглядали можливість корозії металевого урану та переміщення продуктів цього процесу. Водночас вони не виявили повсюдного перевищення критеріїв якості питної води в досліджуваній частині Кувейту. Це добрий приклад різниці між потенційною мобільністю та встановленим перевищенням нормативів.

Danesi et al. (2003) досліджували частинки збідненого урану у вибраних зразках із Косова приблизно через 1,5 року після завершення бойових дій. Виявляли дрібні частинки збідненого урану (DU) та аналізували можливість їх переміщення. Цей випадок звертає увагу на значення розміру частинок для просторового поширення залишків.

Позафронтний вимір впливу

Екологічний наслідок війни не обов'язково пов'язаний із місцем безпосередніх бойових дій. Вплив можуть мати зміни землекористування, переміщення населення, виникнення таборів, обмеження доступу до територій або зміна способу функціонування інфраструктури. Такий тиск може розвиватися за межами зони застосування зброї.

Hagenlocher et al. (2012) аналізували табір внутрішньо переміщених осіб у північному Дарфурі в Судані. Використано багаточасові супутникові знімки дуже високої роздільної здатності. Аналіз охоплював 2002, 2004 та 2008 роки. У міру збільшення площі табору та кількості мешканців спостерігалось зменшення кількості дерев і кущів та деградація частини прилеглої території. Дослідження показує, що дистанційне зондування дає змогу відстежувати екологічні зміни також за межами безпосередньої зони бойових дій.

Rose (2005) аналізував вплив військової діяльності на локальні та регіональні геологічні умови. Він звертав увагу, зокрема, на вибухи, дороги, аеродроми та фортифікації. Спільним елементом цих дій є зміна геометрії поверхні та властивостей ґрунту. Для сучасних досліджень це означає потребу розглядати територію як носій двох видів інформації: матеріальних залишків і стійких просторових змін.

Сучасні безпілотні системи як запропонований новий об'єкт дослідження

Безпілотні системи не слід ототожнювати лише з літаючими дронами. Balestrieri et al. (2021) описують системи, що працюють у повітрі, на суші, а також на поверхні та під поверхнею води. Далі використовуються позначення UAV/UAS для повітряних платформ, UGV для наземних, USV для надводних і UUV для підводних.

У цій статті основним об'єктом аналізу є UAV. Їхні залишки сьогодні легше пов'язати зі спостережуваними діями сучасних конфліктів. Однак це не означає, що запропонована категорія стосується лише повітряних платформ. UGV, USV та UUV можна аналізувати за подібною матеріальною та просторовою схемою.

Технічна література описує UAV за допомогою багатьох параметрів. Chamola et al. (2021) враховують, зокрема, масу, тип рушія, робочу висоту та призначення. Balestrieri et al. (2021) зосереджуються на сенсорах і вимірюваннях, що застосовуються в безпілотних системах. З погляду довкілля повна операційна класифікація, однак, не є найважливішою. Значно важливіше, з чого складається пристрій і у якій формі він може залишитися після втрати.

Negi et al. (2025) звертають увагу на багатоматеріальну будову дронів і аналізують її в контексті життєвого циклу. У конструкціях є метали, полімери та композити, армовані волокнами. Є також електронні компоненти та системи накопичення енергії. Проте результати аналізу життєвого циклу не можна безпосередньо переносити на поведінку військових уламків. Публікація описує склад конструкції. Вона не показує реального вивільнення речовин із уламків у довкілля.

Nashim (2025) описує архітектуру авіоніки, що охоплює зв'язок, живлення, сприйняття, навігацію, планування траєкторії та керування. Залишок після UAV — це тому не лише корпус. Після втрати всієї системи в довкіллі можуть залишатися електронні компоненти, джерела енергії, кабелі, оптичні та конструкційні елементи.

Для екологічних досліджень запропоновано чотири групи залишків UAV. Перша охоплює конструкційні елементи. Друга – функціональні компоненти. Третя – джерела енергії. Четверта – допоміжні та експлуатаційні матеріали. Це робоча класифікація. Її завдання — впорядкувати дослідження, а не створити формальну таксономію.

До конструкційної групи належать метали, полімери та композити. До функціональної — електроніка, кабелі, датчики, оптичні системи та елементи зв'язку. Енергетичну групу становлять передусім акумулятори. До допоміжної можна віднести клеї, смоли, покриття та ізоляцію. Negi et al. (2025) дають основу для матеріальної ідентифікації. Однак їхні дані не дають змоги визначити частку окремих компонентів у реальних воєнних залишках UAV.

На сучасному полі війни кількість використовуваних безпілотних систем є дуже великою. Значна їх частина розглядається як одноразові системи і після виконання завдання покидається або розбивається. Важливою є також просторова форма залишку. Уламки можна записати як точковий або поверхневий об'єкт. Фрагменти можуть утворювати сукупність розосереджених об'єктів. У деяких FPV-системах може виникати також лінійний залишок.

Tytarenko et al. (2025) описують використання оптоволоконних кабелів у FPV-системах в умовах конфлікту. Кабель створює фізичне з'єднання між платформою та оператором. Під час роботи він розмотується з котушки. Після втрати платформи його частина може залишитися вздовж траєкторії польоту. У такому разі виникає тонкий, довгий і просторово безперервний елемент. Він відрізняється від окремого уламка як формою, так і способом можливої інвентаризації.

Наразі немає достатньої кількості польових досліджень, які дали б змогу визначити типову довжину кабелю, що залишається після втрати однієї платформи. Не можна також назвати універсальний час деградації всього кабелю. Кабель має шарувату будову. Серцевина може бути виготовлена зі скла або пластику, а захисні оболонки — з полімерних матеріалів. Швидкість старіння залежить від конкретної конструкції та умов експозиції.

У випадку кабелів потрібно розділити два питання. Перше стосується долі матеріалу. Друге – його фізичної присутності у просторі. Можливість заплутування організмів у кабелях на цьому етапі залишається дослідницькою гіпотезою. Без польових даних не слід подавати її як підтверджений екологічний наслідок.

Найважливішим аргументом для виокремлення залишків UAV як об'єкта дослідження є тому не доведена токсичність. Йдеться про зміну характеру технічних залишків. Одна система містить багато матеріалів, що відрізняє її від традиційних засобів ураження. Після втрати частини системи можуть розосереджуватися. Деякі платформи можуть додатково залишати лінійний слід. Так виникає проблема, масштаб якої сьогодні неможливо визначити на основі літератури.

Залишки безпілотних систем пропонується розглядати як дослідницьку категорію в межах ширшої групи залишків військової техніки. Слово «нова» стосується тут об'єкта дослідження. Воно не означає, що прийнято існування нового механізму забруднення. Гіпотезу потрібно перевірити. Потрібні кількісні вимірювання, матеріальна ідентифікація, спостереження за деградацією та екологічні дослідження.

Просторове та геопросторове значення

Кожна з описаних категорій має власну просторову геометрію. Кратер є поверхневим об'єктом. Фрагмент боєприпасу зазвичай має форму точки або невеликого поверхневого об'єкта. Уламки транспортного засобу можна локалізувати як точку. Зруйновану інфраструктуру натомість потрібно представляти як площу. Тому систематика залишків має враховувати також геометрію об'єкта, що спостерігається.

У випадку UAV місце виявлення залишку не обов'язково відповідає місцю старту. Воно може бути пов'язане з місцем втрати платформи, її розпаду або з трасою кабелю. У FPV-системах особливого значення набуває лінійна геометрія.

Запис кабелю як полілінії дає змогу визначити його довжину, орієнтацію та просторову щільність.

Дослідження, проведені в Україні, показують, що дані про зміни поверхні можна поєднувати з екологічним аналізом. Solokha et al. (2023) використали польові та дистанційні дані для оцінки змін ґрунтів і рослинності. Bonchkovskiy et al. (2025) застосували просторові дані високої роздільної здатності для виявлення вирв та аналізу порушень ґрунту на північному сході України. Domashenko et al. (2025) вказують на корисність геодезичних методів, GNSS, UAV, LiDAR і GIS для моніторингу змін землекористування України в період російської агресії та відбудови.

У майбутній інвентаризації залишків UAV варто записувати щонайменше координати, дату спостереження, джерело даних, тип об'єкта, його стан та оцінку точності локалізації. Ці дані можна поєднати з картами ґрунтів, гідрографією, покривом території та землекористуванням. Тоді аналіз не обмежуватиметься питанням, де знаходиться залишок. Можна буде також перевірити, у якому середовищі він трапляється.

Геоінформаційний підхід особливо корисний там, де безпосередній доступ до території обмежений. Дистанційне зондування може допомогти виявляти зміни поверхні та локалізувати частину об'єктів. Визначення матеріального складу потребує, однак, польових або лабораторних досліджень. Якщо зображення не дає підстав для однозначної ідентифікації матеріалу, воно не повинно замінювати вимірювання.

Обговорення

Література підтверджує наявність екологічних залишків після боєприпасів, військової техніки та промислової діяльності, пов'язаної з війною. Підтверджено також фізичні перетворення території та тривалість частини змін (Certini et al., 2013; Broomandi et al., 2020; Rodríguez-Seijo et al., 2024). Однак ці результати не можна безпосередньо переносити на залишки UAV.

У випадку безпілотних систем добре описано їхню будову та багатоматеріальний характер (Balestrieri et al., 2021; Negi et al., 2025; Hashim, 2025). Також документально підтверджено використання оптоволоконних каналів зв'язку в частині FPV-систем (Tytarenko et al., 2025). Водночас досі бракує достатніх даних про кількість залишків UAV після воєнних дій, їхнє просторове розміщення, швидкість деградації та вплив на конкретні екосистеми. Це насамперед пов'язано з періодом, у якому безпілотні системи почали відігравати провідну роль на полі бою. Він фактично обмежується конфліктом Росія – Україна, що істотно впливає на можливість отримання безпосередніх польових даних.

Тому в цій роботі не наводиться частка залишків UAV у загальній масі воєнних залишків. Не визначається також універсальний час деградації дрона чи кабелю. Конкретним матеріалам не приписуються певні токсикологічні наслідки без емпіричних даних. Такі обмеження потрібні, щоб не змішувати технічну інформацію, механістичну гіпотезу та екологічний результат.

Стаття є першим етапом дослідницької програми. Її завдання — визначити проблему та впорядкувати попередні знання. Наступні роботи мають перейти від ідентифікації до кількісного вимірювання та оцінки механізмів. Таке розділення етапів зменшує ризик робити висновки, які не підтверджуються наявними даними.

Висновки і перспективи подальших досліджень

1. Воєнні дії залишають у довкіллі як стійкі фізичні зміни, так і матеріали, які можуть стати джерелом подальшого тиску.

2. Для потреб досліджень запропоновано дві взаємодоповнювальні осі систематики. Перша описує місце та форму залишку. Друга – механізм виникнення тиску.

3. Найкраще досліджені залишки боєприпасів, метали, енергетичні матеріали, хімічні сполуки та частина радіонуклідів. Їхня поведінка залежить як від властивостей матеріалу, так і від умов довкілля.

4. Безпілотні системи наразі слід відносити до залишків військової техніки. Їхня багатоматеріальна будова та можливість розосередження компонентів, однак, дають підстави розглядати їх як окремий об'єкт дослідження.

5. У частині FPV-систем застосовуються оптоволоконні кабелі. Після втрати платформи вони можуть утворювати лінійну форму залишку. Однак бракує даних, які дозволяли б кількісно оцінити їхню наявність та екологічне значення.

6. Наразі немає підстав вважати залишки UAV доведеним, окремим класом забруднення. Представлена в роботі категорія має характер дослідницької пропозиції.

7. Подальші дослідження мають поєднати геоінформаційну інвентаризацію, матеріальний аналіз, дослідження деградації та міграції, а також оцінку впливу на окремі компоненти довкілля.

Декларація щодо використання штучного інтелекту

Під час підготовки цього рукопису автори використовували генеративний інструмент штучного інтелекту (Claude, Anthropic) для мовно-стилістичного редагування, структурування викладу та перекладу анотації англійською мовою. Після використання цього інструмента автори особисто перевірили, відредагували й переглянули зміст і несуть повну відповідальність за наукову достовірність, дані, інтерпретації та висновки. Інструмент ШІ не застосовувався для генерування наукових результатів, джерел, цитат або числових даних.

Список використаних джерел

1. Balestrieri E., Daponte P., De Vito L., Lamonaca F. Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 4. Art. 1518. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041518>.

2. Bausinger T., Bonnaire E., Preuss J. Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun. *Science of the Total Environment*. 2007. Vol. 382, No. 2–3. P. 259–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.029>.

3. Bem H., Bou-Rabee F. Environmental and health consequences of depleted uranium use in the 1991 Gulf War. *Environment International*. 2004. Vol. 30, No. 1. P. 123–134. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00151-X](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00151-X).

4. Bonchkovskiy O., Ostapenko P., Bonchkovskiy A., Shvaiko V. War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 964. Art. 178594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>.

5. Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F. Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 21. Art. 9002. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12219002>.

6. Certini G., Scalenghe R., Woods W. I. The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*. 2013. Vol. 127. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.009>.

7. Chamola V., Kotes P., Agarwal A., Naren, Gupta N., Guizani M. A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques. *Ad Hoc Networks*. 2021. Vol. 111. Art. 102324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>.

8. Danesi P. R., Markowicz A., Chinea-Cano E., Burkart W., Salbu B., Donohue D., Ruedenauer F., Hedberg M., Vogt S., Zahradnik P., Ciurapinski A. Depleted uranium particles in selected Kosovo samples. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2003. Vol. 64, No. 2–3. P. 143–154. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(02\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(02)00045-0).

9. Domashenko H., Monar D. S., Prokopenko N. Geodetic support for monitoring changes in the land use structure of Ukraine during the period of russian armed aggression and post-conflict recovery. *Land Management, Cadastre and Land Monitoring*. 2025. No. 2. P. 20–32. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2025.02.02>.

10. Hagenlocher M., Lang S., Tiede D. Integrated assessment of the environmental impact of an IDP camp in Sudan based on very high resolution multi-

temporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 126. P. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.08.010>.

11. Hashim H. A. Advances in UAV avionics systems architecture, classification and integration: A comprehensive review and future perspectives. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 25. Art. 103786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103786>.

12. Negi H., Vedrtam A., Kalauni K. Materials and Energy-Centric Life Cycle Assessment for Drones: A Review. *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9, No. 4. Art. 169. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs9040169>.

13. Pichtel J. Distribution and Fate of Military Explosives and Propellants in Soil: A Review. *Applied and Environmental Soil Science*. 2012. Vol. 2012. Art. 617236. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/617236>.

14. Rodríguez-Seijo A., Fernández-Calviño D., Arias-Estévez M. et al. Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: an ecotoxicological review. *Biology and Fertility of Soils*. 2024. Vol. 60. P. 813–844. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>.

15. Rose E. P. F. Impact of Military Activities on Local and Regional Geologic Conditions. *Reviews in Engineering Geology*. 2005. Vol. 16. P. 51–66. DOI: [https://doi.org/10.1130/2005.4016\(05\)](https://doi.org/10.1130/2005.4016(05)).

16. Solokha M., Pereira P., Symochko L., Vynokurova N., Demyanyuk O., Sementsova K., Inacio M., Barcelo D. Russian-Ukrainian war impacts on the environment: Evidence from the field on soil properties and remote sensing. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 902. Art. 166122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166122>.

17. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., Mazur S., Vynokurova N., Sementsova K., Mariychuk R. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13, No. 10. Art. 1614. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13101614>.

18. Stellman J. M., Stellman S. D., Christian R., Weber T., Tomasallo C. The extent and patterns of usage of Agent Orange and other herbicides in Vietnam. *Nature*. 2003. Vol. 422, No. 6933. P. 681–687. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature01537>.
19. Suleimenov I., Kadyrzhan A., Vitulyova Y., Shaltykova D. et al. The use of fiber optics for securing information during command transmission to UAV groups. *International Journal of Information Technology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41870-025-02719-2>.
20. Tytarenko O., Abramov S., Ktitorov M., Synytsina Y. Countering FPV Drones: Insights from Ukraine's Combat Experience. *Advances in Military Technology*. 2025. Vol. 20, No. 2. P. 421–434. DOI: <https://doi.org/10.3849/aimt.01998>.
21. Van Meirvenne M., Meers E., Verstraete S., Smolders E., Tack F. M. G. Could shelling in the First World War have increased copper concentrations in the Belgian soil? *Science of the Total Environment*. 2008. Vol. 391, No. 2–3. P. 170–179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.007>.
22. Williams O. H., Rintoul-Hynes N. L. J. Legacy of war: Pedogenesis divergence and heavy metal contamination on the WWI front line a century after battle. *European Journal of Soil Science*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13297>.
23. Yamamoto M., Komura K., Sakanoue M., Hoshi M., Sawada S., Okajima S. Pu Isotopes, ²⁴¹Am and ¹³⁷Cs in Soils from the Atomic Bombed Areas in Nagasaki and Hiroshima. *Journal of Radiation Research*. 1985. Vol. 26, No. 2. P. 211–223. DOI: <https://doi.org/10.1269/jrr.26.211>.

References

1. Balestrieri, E., Daponte, P., De Vito, L., & Lamonaca, F. (2021). Sensors and measurements for unmanned systems: An overview. *Sensors*, 21(4), Article 1518. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041518>
2. Bausinger, T., Bonnaire, E., & Preuss, J. (2007). Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun.

Science of the Total Environment, 382(2–3), 259–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.029>

3. Bem, H., & Bou-Rabee, F. (2004). Environmental and health consequences of depleted uranium use in the 1991 Gulf War. *Environment International*, 30(1), 123–134. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00151-X](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00151-X)

4. Bonchkovskiy, O., Ostapenko, P., Bonchkovskiy, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment*, 964, Article 178594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>

5. Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: A critical review. *Sustainability*, 12(21), Article 9002. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12219002>

6. Certini, G., Scalenghe, R., & Woods, W. I. (2013). The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*, 127, 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.009>

7. Chamola, V., Kotes, P., Agarwal, A., Naren, Gupta, N., & Guizani, M. (2021). A comprehensive review of unmanned aerial vehicle attacks and neutralization techniques. *Ad Hoc Networks*, 111, Article 102324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>

8. Danesi, P. R., Markowicz, A., Chinea-Cano, E., Burkart, W., Salbu, B., Donohue, D., Ruedenauer, F., Hedberg, M., Vogt, S., Zahradnik, P., & Ciurapinski, A. (2003). Depleted uranium particles in selected Kosovo samples. *Journal of Environmental Radioactivity*, 64(2–3), 143–154. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(02\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(02)00045-0)

9. Domashenko, H., Monar, D. S., & Prokopenko, N. (2025). Geodetic support for monitoring changes in the land use structure of Ukraine during the period of Russian armed aggression and post-conflict recovery. *Land Management, Cadastre and Land Monitoring*, (2), 20–32. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2025.02.02>

10. Hagenlocher, M., Lang, S., & Tiede, D. (2012). Integrated assessment of the environmental impact of an IDP camp in Sudan based on very high resolution multi-temporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 126, 27–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.08.010>
11. Hashim, H. A. (2025). Advances in UAV avionics systems architecture, classification and integration: A comprehensive review and future perspectives. *Results in Engineering*, 25, Article 103786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103786>
12. Negi, H., Vedrtam, A., & Kalauni, K. (2025). Materials and energy-centric life cycle assessment for drones: A review. *Journal of Composites Science*, 9(4), Article 169. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs9040169>
13. Pichtel, J. (2012). Distribution and fate of military explosives and propellants in soil: A review. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012, Article 617236. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/617236>
14. Rodríguez-Seijo, A., Fernández-Calviño, D., Arias-Estévez, M., et al. (2024). Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review. *Biology and Fertility of Soils*, 60, 813–844. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>
15. Rose, E. P. F. (2005). Impact of military activities on local and regional geologic conditions. *Reviews in Engineering Geology*, 16, 51–66. DOI: [https://doi.org/10.1130/2005.4016\(05\)](https://doi.org/10.1130/2005.4016(05))
16. Solokha, M., Pereira, P., Symochko, L., Vynokurova, N., Demyanyuk, O., Sementsova, K., Inacio, M., & Barcelo, D. (2023). Russian-Ukrainian war impacts on the environment: Evidence from the field on soil properties and remote sensing. *Science of the Total Environment*, 902, Article 166122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166122>
17. Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), Article 1614. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13101614>

18. Stellman, J. M., Stellman, S. D., Christian, R., Weber, T., & Tomasallo, C. (2003). The extent and patterns of usage of Agent Orange and other herbicides in Vietnam. *Nature*, 422(6933), 681–687. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature01537>
19. Suleimenov, I., Kadyrzhan, A., Vitulyova, Y., Shaltykova, D., et al. (2025). The use of fiber optics for securing information during command transmission to UAV groups. *International Journal of Information Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41870-025-02719-2>
20. Tytarenko, O., Abramov, S., Ktitorov, M., & Synytsina, Y. (2025). Countering FPV drones: Insights from Ukraine's combat experience. *Advances in Military Technology*, 20(2), 421–434. DOI: <https://doi.org/10.3849/aimt.01998>
21. Van Meirvenne, M., Meers, E., Verstraete, S., Smolders, E., & Tack, F. M. G. (2008). Could shelling in the First World War have increased copper concentrations in the Belgian soil? *Science of the Total Environment*, 391(2–3), 170–179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.007>
22. Williams, O. H., & Rintoul-Hynes, N. L. J. (2022). Legacy of war: Pedogenesis divergence and heavy metal contamination on the WWI front line a century after battle. *European Journal of Soil Science*. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13297>
23. Yamamoto, M., Komura, K., Sakanoue, M., Hoshi, M., Sawada, S., & Okajima, S. (1985). Pu isotopes, ²⁴¹Am and ¹³⁷Cs in soils from the atomic bombed areas in Nagasaki and Hiroshima. *Journal of Radiation Research*, 26(2), 211–223. DOI: <https://doi.org/10.1269/jrr.26.211>

O. Kempa, Zh. Vyrva, A. Koshel, M. Kempa, A. Rozak

ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF MILITARY ACTIONS: AN ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL POLLUTION CAUSED BY UNEXPLODED ORDNANCE, INFRASTRUCTURE DAMAGE AND DEBRIS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

***Abstract.** Armed conflicts leave a lasting mark on the environment. They alter the landscape and leave behind materials whose presence does not cease with the end*

of hostilities. The aim of this study is to categorise such residues. Four main criteria have been adopted: source, area of distribution, mechanism of impact and material properties. The study draws on research findings from former battlefields, military sites and areas of current conflict. It examines munitions remnants, metals, energy materials, chemicals, radionuclides, fuel, technical waste and permanent changes to the terrain. Examples from France, Belgium, Vietnam, Kosovo, the Persian Gulf region and Ukraine show that environmental pressure can arise in various ways. It may occur at the site of weapon deployment, at the site of equipment destruction, during the subsequent handling of remnants, or as a result of changes in land use. In this broader context, unmanned systems are proposed as a new subject of study regarding technical remnants. Their construction involves a variety of materials. It covers metals, polymers, composites, electronics and energy sources. Fibre-optic cables are also used in some FPV systems. When a platform is lost, they can leave a linear trail on the ground. The scale of this phenomenon and its environmental consequences are as yet unknown. The available data do not allow these residues to be compared with well-studied munitions residues. Therefore, this article is primarily of a systematic and identificatory nature. It sets out directions for further research: spatial inventory, material identification, assessment of degradation and migration, as well as studies into the potential impact on soil, water, vegetation and fauna.

Keywords: *armed conflict, environmental pressure, munitions, soil contamination, unmanned systems, geoinformation.*