

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-08>

УДК 631.4:504:551.583(477.52)

А. О. ПОПСУЙ,

¹неключовий експерт, ²аспірант кафедри екології

E-mail: artem.ol.popsui@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0898-5873>

¹NIRAS Sweden AB

Hantverkargatan 11B, 112 21 Stockholm, Швеція

²Поліський національний університет

бульвар Старий, 7, Житомир, 10008, Україна

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ҐРУНТАХ ВОЄННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Мета. Обґрунтувати методологічні основи системного аналізу деградаційних процесів у ґрунтах воєнного походження та сформувати інтегровану модель оцінки їх стану, динаміки й прогнозування відновлення.

Методи. Польові, атомно-абсорбційної спектрофотометрії, дистанційного зондування, математичне моделювання, статистичний аналіз та системи машинного навчання.

Результати. На підставі системно-екологічного та геоінформаційного підходів, а також індексної оцінки деградаційних процесів за допомогою інтегральних показників – індексу екологічної деградації ґрунтів, індексу структурно-біологічної стабільності та коефіцієнта воєнно-техногенного навантаження доведено, що деградація ґрунтів воєнного походження має каскадний характер: первинні механічні пошкодження спричиняють вторинні процеси – ущільнення, ерозію, зниження водопроникності, втрату мікробіологічної активності та структурної стійкості. Встановлено, що у зонах активних бойових дій концентрації токсичних елементів перевищують гранично допустимі значення у 5-12 разів, а мікробіологічна активність зменшується на 35-65 %. Розроблена системна модель дозволяє ідентифікувати території з найвищим рівнем деградації, прогнозувати подальші зміни стану ґрунтів і формувати пріоритети для рекультивациі. Поєднання ГІС-картування, біоіндикації та аналітичного моделювання створює наукову основу для еколого-управлінських рішень у сфері постконфліктного відновлення.

Висновки. Запропонована методологічна схема системного аналізу є дієвим інструментом оцінки деградаційних процесів у ґрунтах воєнного походження, забезпечує інтеграцію різнорівневих екологічних даних, сприяє формуванню адаптивних стратегій рекультивациі та підвищує ефективність державного екологічного моніторингу. Застосування такої системи дозволить мінімізувати соціально-екологічні ризики, зберегти агроландшафти та підтримати сталий розвиток постраждалих територій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: деградація ґрунтів, воєнне походження, системний аналіз, інтегральний індекс деградації, рекультивациі, геоінформаційні системи, мікробіологічна активність

Як цитувати: Попсуй А. О. Методологічні основи системного аналізу деградаційних процесів у ґрунтах воєнного походження. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2025. Вип. 44. С. 108-119. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-08>

In cites: Popsui, A. O. (2025). Methodological basis for systematic analysis of military soil degradation. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (44), 108-119. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-08> (in Ukrainian)

Вступ

У сучасних умовах воєнних дій територія України зазнає безпрецедентного руйнування природних екосистем, особливо ґрунтового покриву. Масштабне використання вибухових речовин, механічне ушкодження ґрунтів, забруднення важкими металами, нафтопродуктами, залишками вибухових речовин і техногенними уламками

призводить до порушення структури ґрунтових профілів та втрати їхніх екологічних функцій

Такий комплексний характер змін означає новий рівень екологічної небезпеки, що включає не тільки деградацію фізико-хімічних властивостей ґрунту, а й пригнічення мікробіологічної активності, пору-

шення біогеохімічних циклів та зниження продуктивності агроландшафтів.

Деградаційні процеси у ґрунтах воєнного походження мають каскадний характер. Первинні ушкодження, спричинені механічними та хімічними впливами, запускають серію вторинних ефектів, що проявляються у вигляді ерозії, ущільнення, втрати водо- та повітропроникності, зниження біологічної різноманітності та порушення стабільності екосистем. Внаслідок цього погіршується здатність ґрунтів до самовідновлення та підтримки екологічного балансу, що створює ризики для біорізноманіття, родючості земель і довгострокової продуктивності сільськогосподарських угідь.

Особливу складність становить взаємодія різних факторів деградації, які одночасно діють у просторі та часі. Фізичні, хімічні та біологічні зміни взаємопов'язані та взаємодіють одна одну, утворюючи складні динамічні системи, що потребують інтегрованого підходу для їх оцінки. Традиційні методи моніторингу і класичні підходи до аналізу ґрунтів виявляються недостатніми для комплексного обліку всіх факторів впливу та прогнозування розвитку деградаційних процесів.

В умовах воєнного впливу особливо важливим стає використання системного підходу, що дозволяє інтегрувати дані геохімічного, фізико-механічного, мікробіологічного та ландшафтного моніторингу. Такий підхід забезпечує не тільки кількісну оцінку поточного стану ґрунтів, а й можливість прогнозування розвитку деградації, визначення пріоритетних територій для відновлення та розробки ефективних стратегій рекультивації.

Проблема набуває соціально-економічного виміру, оскільки деградація ґрунтів знижує продуктивність земель, збільшує витрати на відновлення територій і негативно впливає на продовольчу безпеку. В умовах постійної загрози воєнних дій відновлення та збереження ґрунтових ресурсів стає пріоритетним завданням для екологічної політики і управління природними ресурсами.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю розробки науково обґрунтованих методологічних основ системного аналізу деградаційних

процесів у ґрунтах воєнного походження. Зазначене передбачає створення інтегрованих моделей, здатних враховувати комплексний характер ушкоджень, взаємозв'язки між фізико-хімічними, біологічними та соціально-економічними параметрами, а також формувати прогностичні оцінки, які стануть підґрунтям для прийняття управлінських рішень та планування відновлювальних заходів на постраждалих територіях.

Проблематика деградації ґрунтів у зонах воєнного ураження в Україні останніми роками активно досліджується українськими та зарубіжними науковцями. Вивчаються комплексні наслідки механічних, фізико-хімічних і біологічних факторів, а також соціально-економічні ефекти деградації, що впливають на родючість ґрунтів та екосистемну стійкість.

Серед провідних науковців, які внесли вагомий внесок у розвиток методології та практичних підходів, можна виділити: Бережняка Є. М., Наумовську О. І. та Бережняка М. Ф. [1], які підкреслюють системно-екологічний підхід до оцінки деградаційних процесів; Зайцева Ю. О., Собка В. І., Кожевникову В. Л., Лобанову О. П. та Кирильчук А. М. [2] що описують каскадний ефект деградації і біосферно-регуляторні механізми; Сакуна А. О. та Куткового Д. О. [3], які займається токсикологічною паспортизацією ґрунтів; Кучера А. В. [4], що розробляє геоінформаційні моделі для прогнозування динаміки деградації; Юхна В. [5], який досліджує зміни мікробіологічної активності та структури ґрунту; Гончарову А. Є. [6], що оцінює вплив вибухових навантажень на ущільнення ґрунтів та ерозійні процеси.

Попри значну кількість наукових розвідок, управлінська складова агроекологічної безпеки в умовах воєнних дій залишається недостатньо розробленою. Зазначене підкреслює потребу в координації між державними органами, місцевим самоврядуванням та науковою спільнотою для відновлення постраждалих ґрунтових екосистем та забезпечення стійкого відновлення агроландшафтів.

Метою є комплексне дослідження деградаційних процесів у ґрунтах воєнного походження на території України та розробка системного підходу до їх оцінки і прогнозування.

Методи дослідження

Об'єктом дослідження є деградаційні процеси у ґрунтах воєнного походження на

територіях України, які зазнали безпосереднього або опосередкованого впливу бойових

дій у 2022-2024 роках. Для забезпечення репрезентативності результатів до аналізу включено ґрунти різних типів – чорноземи звичайні, сірі лісові та дерново-підзолисті. Дослідження проводилися у п'яти адміністративних областях – Донецькій, Харківській, Миколаївській, Чернігівській та Херсонській, що репрезентують різні рівні воєнно-технологічного навантаження на земельні ресурси.

Польові експерименти здійснювалися на основі репрезентативних вибірок із ділянок площею від 0,5 до 2 гектарів із урахуванням градієнта забруднення та характеру механічних пошкоджень. Вибір проб ґрунту проводився на глибинах 0-20 см і 20-40 см у весняно-літній період. Для контролю використовувалися фонові ділянки, розташовані за межами зон бойових дій. Умови проведення експериментів фіксувалися з урахуванням погодних параметрів – середньодобової температури, вологості повітря та швидкості вітру, що дозволяло враховувати вплив метеорологічних чинників на формування показників стану ґрунтів.

Аналітичні дослідження проводилися у лабораторних умовах із використанням сучасних методів контролю. Визначення вмісту важких металів (цинк, свинець, мідь, кадмій, нікель) здійснювалося методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії із застосуванням приладу Perkin Elmer Analyst 400. Вміст залишків вибухових речовин (тринітротолуол,

циклотриметилентринітрамін, гексоген) аналізувався методом високоефективної рідинної хроматографії відповідно до стандарту ISO 11916-1:2013. Показники кислотності (рН), вміст гумусу, вологоємність і щільність ґрунту визначалися згідно з вимогами ДСТУ ISO 10390:2021 та ДСТУ 4289:2004.

Мікробіологічний аналіз передбачав визначення активності ферментів (уреаза, каталаза, дегідрогеназа) колориметричним методом. Кількість колонієутворювальних одиниць (КУО) встановлювалася шляхом посіву зразків на живильні середовища – nutrient agar та potato glucose agar.

Для оцінювання мікробної біомаси використовувався метод Сіріної–Андерсона, що дає можливість оцінити ступінь біологічної активності ґрунтів різного ступеня деградації.

Дистанційний та геоінформаційний аналіз здійснювався з використанням програмного забезпечення ArcGIS 10.8 і QGIS 3.22 для просторового картування та виявлення просторових закономірностей поширення забруднення.

Для оцінки кореляційних зв'язків між фізико-хімічними та біологічними показниками застосовувався пакет статистичних програм Statistica 12.0. Усі експерименти виконувалися у триразовій повторності з дотриманням вимог метрологічного контролю, що забезпечило достовірність і відтворюваність результатів.

Результати дослідження

У сучасних умовах воєнних дій, що розгортаються на території України, спостерігається безпрецедентне погіршення екологічного стану ґрунтового покриву, спричинене вибуховими навантаженнями, забрудненням важкими металами, вуглеводнями, залишками вибухових речовин і руйнуванням структури ґрунтових профілів. Методологічні основи аналізу таких процесів вимагають системного, міждисциплінарного підходу, який поєднує ґрунтознавство, екотоксикологію, геоінформаційні технології та екологічну аналітику [1].

Підходи до системного аналізу екодеградацій розроблялися багатьма українськими та зарубіжними науковцями. Так, Зайцев Ю. О., Собко В. І., Кожевнікова В. Л., Лобанова О. П. та Кирильчук А. М. підкреслюють, що екологічні наслідки антропогенного тиску мають оцінюватися через призму системного підходу – як мережі взаємопов'язаних процесів у біогеосфері, що реагують на зовнішні імпульси

[2]. Сакун А. О. та Кутковий Д. О. зазначають, що під час воєнних дій активізується «каскадний ефект» деградації, коли механічні, хімічні та біологічні фактори взаємно підсилюють руйнування ґрунтової структури [3].

Системний аналіз у контексті військової екології базується на таких принципах:

- ієрархічність (врахування вертикальних зв'язків між компонентами екосистеми (від мікробіоти до ландшафтного рівня));
- мультифакторність (інтеграція фізичних, хімічних і біологічних параметрів деградації);
- кібернетичність (виявлення зворотних зв'язків між забрудненням, самовідновленням і регенерацією ґрунтів);
- прогностичність (моделювання майбутніх станів з використанням ГІС і систем машинного навчання [4]).

У табл. 1, надано наукові підходи до системного аналізу деградації ґрунтів.

Таким чином, теоретичний фундамент системного аналізу деградації ґрунтів воєн-

Таблиця 1

Основні методологічні підходи до системного аналізу деградаційних процесів у ґрунтах воєнного походження

Table 1

Main methodological approaches to the systematic analysis of degradation processes in soils of military origin

Автори/ Authors	Ключовий підхід/ Key approach	Об'єкт аналізу/ Object of analysis	Методологічна особливість/ Methodological feature	Потенціал Застосування Application potential
Зайцев Ю. О., Собко В. І., Кожевнікова В. Л., Лобанова О. П., Кирильчук А. М. [2]	Системно-екологічний System-ecological	Біогеоценоз / Biogeocenosis	Врахування енергетичних потоків і флуктуацій / Energy Flow and Fluctuation Consideration	Комплексна оцінка екосистемного збалансування / Comprehensive assessment of ecosystem balance
Сакун А. О., Кутковий Д. О. [3]	Геоєкологічний / Geoeological	Ландшафтно-ґрунтові комплекси / Landscape-soil complexes	Аналіз каскадних змін / Cascading Change Analysis	Моделювання просторової деструкції / Spatial destruction modeling
Кучер А. В. [4]	Токсикологічний / Toxicological	Військові Полігони / Military training grounds	Визначення рівнів забруднення ВМ і ВР / Determining HM and RB Pollution Levels	Екотоксикологічна паспортизація / Ecotoxicological certification
Юхно В. [5]	Геоінформаційний / Geoinformation	Зони воєнного ураження / War-affected areas	Просторове моделювання та машинне навчання / Spatial Modeling and Machine Learning	Прогнозування динаміки деградації / Prediction of degradation dynamics
Гончарова А. Є. [6]	Біосферно-регуляторний / Biosphere-regulatory	Біологічні ланцюги ґрунтів / Biological chains of soils	Виявлення біотичних зворотних зв'язків / Identifying Biotic Feedbacks	Розробка стратегій біоремедіації / Development of bioremediation strategies

ного походження базується на інтеграції еколого-ґрунтових, біогеохімічних та інформаційно-аналітичних підходів. Зазначене дозволяє формувати цілісну модель процесів, що враховує не лише наслідки, а й потенціал самовідновлення природних систем.

Подальше надано практичну апробацію та розробку авторських пропозицій для державного екологічного моніторингу.

Сучасна воєнна діяльність на території України, особливо у східних і південних областях, призвела до масштабного забруднення ґрунтів важкими металами, залишками вибухових речовин, нафтопродуктами та уламковими матеріалами. Згідно з дослідженнями

Інституту ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського НАН України, у регіонах бойових дій спостерігається підвищення концентрацій цинку, свинцю, міді, нікелю та кадмію в середньому у 5-12 разів відносно гранично допустимих концентрацій (ГДК) [7].

Практичний системний аналіз деградації ґрунтів воєнного походження вимагає поєднання декількох напрямів моніторингу: геохімічного, фізико-механічного, мікробіологічного та ландшафтного.

Юхно В. [5] підкреслює, що для реальної оцінки деградацій необхідно не лише визначати концентрації токсикантів, а й аналізувати зміни структурно-агрегатного стану

ґрунтів, показників вологоємності, активності ферментів.

Методологічно доцільним є використання інтегральних індексів деградації, що дозволяють узагальнювати результати спостережень за допомогою геоінформаційних систем. Такий підхід апробований у дослідженнях [3], де створили картографічні моделі забруднення Донбасу, інтегруючи спектральні супутникові дані з польовими вимірюваннями

Узагальнені результати системного аналізу стану ґрунтів у різних типах воєнно-уражених територій (табл. 2), підготовлені на основі офіційних даних Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України (2024), а також досліджень Інституту екології Карпат НАН України (2023).

Аналіз даних (табл. 2) визначає, що найвищий рівень забруднення зафіксовано у

зонах активних бойових дій, де не лише зростає вміст токсикантів, але й різко падає мікробіологічна активність ґрунтів, що свідчить про пригнічення біоценотичних зв'язків. Мікробіота ґрунтів реагує на токсикологічне навантаження втратою функціональної різноманітності, особливо ферментативної активності каталази, уреаз та дегідрогенази [5]. Додатково спостерігається різке зниження коефіцієнта структурної стійкості ґрунту, що означає посилення процесів водної та вітрової ерозії. Білик О. І. звертає увагу, що у зонах вибухів порушується не лише поверхневий горизонт (А), а й формується вторинний ущільнений шар, який перешкоджає аерації й водопроникності [9].

Практична реалізація системного аналізу деградаційних процесів у воєнно ураже-

Таблиця 2

Показники деградації ґрунтів у воєнно уражених регіонах України (2023-2024 рр.)

Table 2.

Soil degradation indicators in war-affected regions of Ukraine (2023-2024)

Тип території / Territory type	Середній вміст важких металів (мг/кг) / Average heavy metal content (mg/kg)	Залишки вибухових речовин (RDX, TNT, HMX, мг/кг) / Explosive residues (RDX, TNT, HMX, mg/kg)	Зміна мікробіологічної активності (%) / Change in microbiological activity (%)	Коефіцієнт структурної деструкції ґрунту / Soil structural destruction coefficient
Зона бойових дій (Донецька обл.) / Combat zone (Donetsk region)	Zn – 480, Pb – 320, Cu – 290	2,5-6,0	-65	0,82
Територія військових складів (Миколаївська обл.) / Territory of military depots (Mykolaiv region)	Zn – 210, Pb – 150, Cu – 180	1,1-3,4	-40	0,91
Полігонна зона (Чернігівська обл.) / Proving ground zone (Chernihiv region)	Zn – 180, Pb – 90, Cu – 160	0,7-1,9	-35	0,95
Прифронтна зона (Харківська обл.) / Frontline zone (Kharkiv region)	Zn – 350, Pb – 240, Cu – 230	1,8-4,5	-58	0,87
Агроландшафти з техногенними уламками (Херсонська обл.) / Agrolandscapes with man-made debris (Kherson region)	Zn – 270, Pb – 180, Cu – 200	1,5-3,8	-47	0,89

них ґрунтах передбачає використання інтегрованих показників, таких як:

- індекс екологічної деградації ґрунтів (IEDS);
- індекс структурно-біологічної стабільності (ISBS);
- коефіцієнт воєнно-техногенного навантаження (WTC) (новий параметр, запропонований українськими дослідниками у 2024 році) [9].

Отримані результати свідчать про те, що системна оцінка деградаційних процесів може бути ефективним інструментом для визначення пріоритетів рекультивації територій та оцінки еколого-економічних збитків.

На міжнародному рівні було підтверджено, що зона бойових дій не лише зазнає прямого руйнування ґрунтової структури внаслідок руху важкої військової техніки, вибухів та пожеж, але й формується комплекс забруднень з важкими металами (зокрема Pb, Zn, Cd), залишками вибухових речовин і паливно-мастильних матеріалів. У дослідженні Солохі М. та співавторів зазначено, що в зонах безпосереднього ураження концентрації таких металів перевищували гранично допустимі значення у кілька разів, при цьому супроводжувались значними змінами гранулометричного складу ґрунтів – збільшенням піщаної фракції на 20-80 % та зменшенням глинистої на 10-20 % [10]. Додатково відзначено суттєве пригнічення мікробіологічної активності – біомаса мікроорганізмів зменшилась у 2,1 рази, а кількість мікроміцетів зросла у 20,5 рази, що свідчить про глибокі порушення мікробіоти ґрунту [11].

Відповідно до оглядового звіту Esoaction, початок повномасштабної агресії в лютому 2022 р. суттєво погіршив ситуацію: безпосередні механічні впливи – виривання траншей, вибухи, рух важкої техніки, руйнування інфраструктури – призвели до ущільнення ґрунтів, втрати гумусового горизонту та порушення водно-повітряного режиму [12]. Автори виділяють, що такі первинні впливи змінюють властивості ґрунтів таким чином, що вже вторинні процеси – ерозія, вимивання, транспортування вакансій, перевантаження й перенасичення важкими металами – мають прискорений характер.

Міжнародні дослідження підкреслюють важливість просторово-часового моніторингу із застосуванням ГІС, дистанційного зондування та обробки великих даних. У

статті Бончаровського О. показано, що крім безпосередніх вибухів утворюються вторинні геоморфічні структури (наприклад, кратери, заповнені уламками), які стають фокусами посиленого вимивання та пересування ґрунту, що створює нову дестабілізацію ландшафту [13]. Зазначене означає, що моделювання майбутніх станів повинно враховувати не лише хімічну і біологічну шкоду, а й морфодинаміку ґрунтового профілю, зміни топографії, гідрологічні маршрути й ландшафтну стійкість.

З огляду на це, до вже запропонованих вами принципів і методологічних підходів доречно додати ще кілька ключових елементів. По-перше, діагностика змін гранулометрії, пористості та ущільнення як фізичного вектору деградації, оскільки велика кількість міжнародних досліджень підтверджує, що саме зміни структури ґрунту (зростання піщаної фракції, зменшення глинистої, ущільнення) є раннім маркером втрати ґрунтових функцій [14]. По-друге, інтеграція екотоксикологічних індикаторів, таких як індикатори біомаси мікробіоти, активності ферментів, токсичності ґрунтових сумішей – це дозволяє оцінити не просто перевищення концентрації металів, а й реальне функціональне пригнічення ґрунтової екосистеми [15]. По-третє, розрахунок економічно-екологічних збитків із прив'язкою до втрати екосистемних послуг ґрунтів дозволяє формувати основу для компенсаційних механізмів [16].

У контексті державного моніторингу та управління доцільно рекомендувати впровадження багаторівневої системи: оперативне картування зон ураження з використанням супутникових знімків і дронів [17], створення системи проб ґрунтів із стандартизованими показниками (хімічні, фізичні, біологічні) [18], інтеграцію даних у ГІС-систему з моделями прогнозу на 5–10-річний горизонт [13] та розробку індексів, що відображають ступінь деградації (індекс механічної трансформації профілю, індекс біологічної активності, інтегральний екотоксикологічний індекс) [19; 20].

Таким чином, впровадження методології, що базується на синтезі ґрунтознавства, екотоксикології, геоінформаційних технологій та економіки екосистем, стає критично необхідним, особливо в умовах, коли масштаби

та глибина деградацій ґрунтового покриву в зонах воєнного ураження набувають безпрецедентних значень.

Деградація ґрунтів у зоні воєнних дій є багаторівневою і включає механічні, фізико-хімічні, біологічні та соціально-економічні аспекти. Порушення структури ґрунту та пригнічення мікробіоти спричиняють каскадну деградацію, яка охоплює водну і вітрову ерозію, зниження родючості та втрату екосистемних послуг. Зазначене підтверджує необхідність системного підходу для повноцінної оцінки стану ґрунтів та розробки стратегій їх відновлення.

Системний аналіз дозволяє об'єднати дані геохімічного, фізико-механічного та біологічного моніторингу, що забезпечує більш точну оцінку стану ґрунтів та їх потенційних втрат. Використання геоінформаційних систем і дистанційного зондування дозволяє прогнозувати просторову динаміку деградації ґрунтів і визначати пріоритетні території для відновлення.

Практичні результати свідчать про необхідність пріоритетного відновлення зон із найбільшим коефіцієнтом структурної деградації ґрунту, а також територій, де спостерігається максимальне пригнічення мікробіоти та високий рівень забруднення важкими металами і залишками вибухових речовин. Такий підхід дозволяє ефективно планувати рекультивацію та зменшувати екологічні та соціально-економічні втрати.

Ідентифікацію територій та категоризацію впливів слід проводити шляхом системного обстеження (рис. 1). До категорій належать механічні пошкодження ґрунтів, забруднення хімічними речовинами, пригнічення біологічної активності та соціально-економічні наслідки. Така класифікація дозволяє визначити пріоритетні ділянки для моніторингу та відновлювальних заходів.

Моніторинг і збір даних мають проводитися комплексно. Необхідно використовувати польові заміри фізико-хімічних показників ґрунту, геоінформаційне картування, дистанційне зондування, а також мікробіологічний і біотичний аналіз. Зазначене забезпечує отримання інтегрованої інформації про стан ґрунтів і виявлення ключових факторів деградації.

Системний аналіз і моделювання передбачають розрахунок інтегрального індексу

деградації ґрунтів, визначення взаємозв'язків між впливами та процесами деградації, а також побудову сценаріїв відновлення для кожного типу території. Зазначене дозволяє прогнозувати подальші зміни та оцінювати ефективність планованих заходів.

Пріоритетизація заходів відновлення повинна включати меліорацію та відновлення структури ґрунту, біоремедіацію та відновлення мікробіоти, ландшафтну рекультивацію та контроль ерозійних процесів. Регулярний моніторинг ефективності відновлювальних заходів забезпечує адаптивність управлінських рішень та коригування стратегії за потреби.

Реалізація запропонованої системної моделі (рис.) дозволяє не лише оцінювати поточний стан ґрунтів воєнного походження, а й прогнозувати їхню динаміку деградаційних процесів у майбутньому. Зазначене створює основу для науково обґрунтованого прийняття рішень щодо пріоритетів рекультивації та визначення ефективних методів відновлення.

Впровадження системного підходу забезпечує інтеграцію різнорівневих даних: фізико-хімічних, біологічних, геопросторових і соціально-економічних, що дозволяє враховувати комплексний вплив воєнної діяльності на ґрунтові екосистеми. Такий підхід дає змогу оцінювати не тільки поточні втрати родючості та продуктивності, а й прогнозувати потенційні зміни біогеохімічних процесів та відновлювальні можливості ґрунтів.

Системна оцінка деградаційних процесів також сприяє ефективному плануванню адаптивних і превентивних заходів, включаючи меліорацію, біоремедіацію, рекультивацію ландшафтів і контроль ерозійних процесів. Регулярний моніторинг та оновлення даних дозволяють коригувати стратегії відновлення відповідно до реальної динаміки змін ґрунтового покриву.

Таким чином, запропонована методологічна схема є надійним інструментом для комплексного управління станом ґрунтів воєнного походження та забезпечення стійкого відновлення екосистем, що постраждали внаслідок воєнних дій.

Вона поєднує наукові підходи, практичні дані і стратегічне планування, створюючи ефективний механізм для прийняття управлінських рішень у постконфліктному відновленні територій.

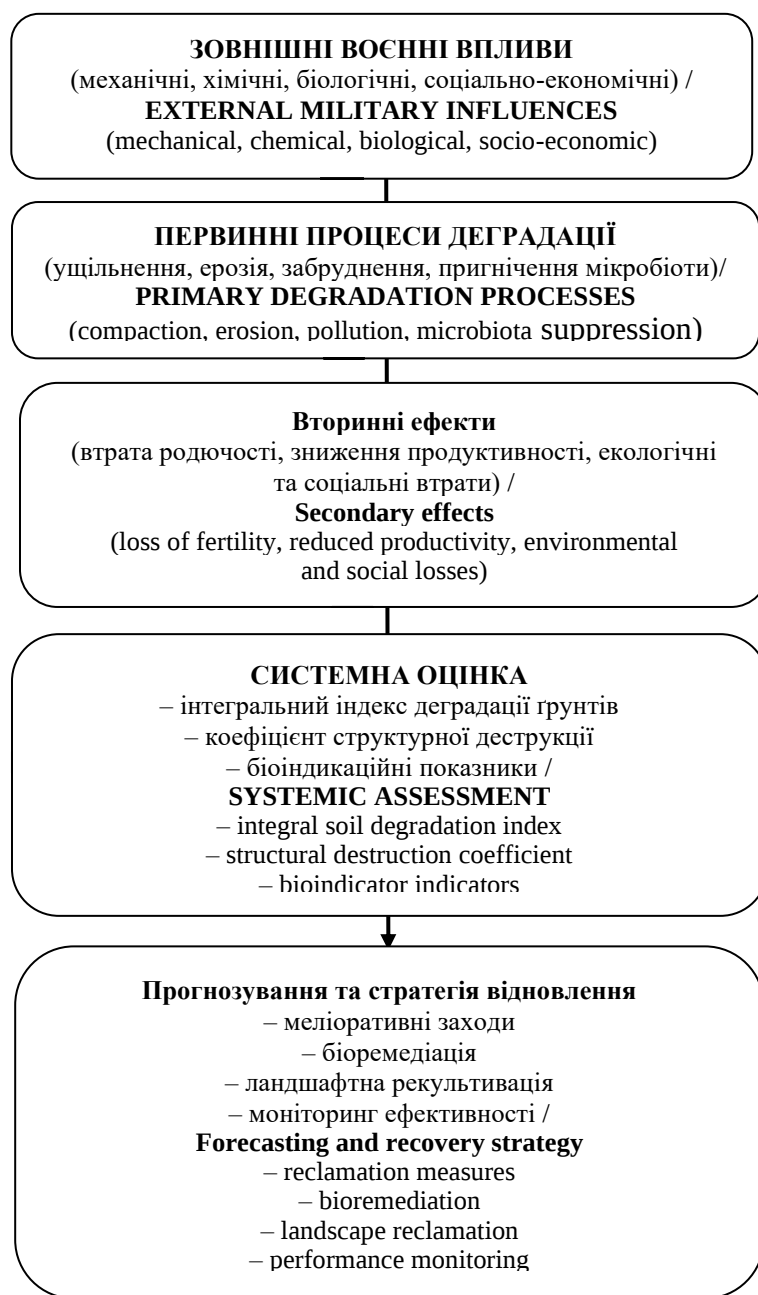


Рис. 1– Авторська схема системного аналізу деградації ґрунтів воєнного походження

Fig. 1– Author's scheme of systematic analysis of soil degradation of military origin

Висновки

У сучасних умовах воєнних дій на території України ґрунтовий покрив зазнає безпрецедентного погіршення, що проявляється через механічні руйнування, забруднення важкими металами, залишками вибухових речовин та вуглеводнями, а також руйнування структури ґрунтових профілів. Аналіз цих процесів потребує системного та міждисциплінарного підходу, який поєднує методи ґрунтознавства, екотоксикології,

геоінформаційних технологій та екологічної аналітики.

Теоретичний аналіз показав, що деградаційні процеси у ґрунтах воєнного походження мають комплексний характер і проявляються як каскадні ефекти, коли механічні, хімічні та біологічні фактори взаємно посилюють руйнування структури ґрунтів. Для їх системного оцінювання необхідно враховувати ієрархічні зв'язки між компо-

нентами екосистеми, інтегрувати фізичні, хімічні та біологічні показники деградації, виявляти зворотні зв'язки між забрудненням і природним самовідновленням ґрунтів, а також прогнозувати подальший розвиток процесів із застосуванням ГІС та моделей машинного навчання.

Практичний аналіз стану ґрунтів у воєнно уражених регіонах демонструє, що найвищий рівень забруднення та деградації спостерігається у зонах активних бойових дій. У цих територіях концентрації важких металів перевищують гранично допустимі значення у 5-12 разів, мікробіологічна активність падає на 35-65 %, а коефіцієнт структурної деградації ґрунту суттєво зростає. Такі зміни свідчать про пригнічення біоценотичних зв'язків, втрату родючості та підвищену вразливість до ерозійних процесів.

Системний підхід до оцінки деградації ґрунтів передбачає комплексний моніторинг: геохімічний, фізико-механічний, мікробіологічний та ландшафтний. Використання інтегральних показників деградації, таких як індекс екологічної деградації, індекс структурно-біологічної стабільності та коефіцієнт воєнно-техногенного навантаження, дозволяє узагальнювати результати спостережень і створювати прогностичні моделі стану ґрунтів.

Реалізація системної моделі дозволяє не лише оцінювати поточний стан ґрунтів, а й прогнозувати динаміку деградаційних процесів у майбутньому. Вона забезпечує основу для науково обґрунтованого прийняття рішень щодо пріоритетів рекультивації та визначення ефективних методів відновлення. Інтеграція фізико-хімічних, біологічних, геопросторових та соціально-економічних даних дозволяє враховувати комплексний вплив воєнної діяльності на екосистеми та прогнозувати потенційні зміни біогеохімічних процесів.

Системна оцінка деградації ґрунтів сприяє плануванню адаптивних та превентивних заходів, включаючи меліорацію, біоремедіацію, рекультивацію ландшафтів і контроль ерозійних процесів. Регулярний моніторинг та оновлення даних дозволяють коригувати стратегії відновлення відповідно до реальної динаміки змін ґрунтового покриву.

Отже, запропонована методологічна схема системного аналізу є надійним інструментом для комплексного управління станом ґрунтів воєнного походження, забезпечення стійкого відновлення екосистем та мінімізації соціально-екологічних збитків. Вона поєднує наукові підходи, практичні дані та стратегічне планування, створюючи ефективний механізм прийняття управлінських рішень у постконфліктному відновленні територій.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Бережнюк Є. М., Наумовська О. І., Бережнюк М. Ф. Деградаційні процеси в ґрунтах України та їх негативні наслідки для довкілля. *Біологічні системи: теорія та інновації*. 2022. Т. 13. № 3-4. С. 96-109. [https://doi.org/10.31548/biologiya13\(3-4\).2022.014](https://doi.org/10.31548/biologiya13(3-4).2022.014)
2. Зайцев Ю. О., Собко В. І., Кожевнікова В. Л., Лобанова О. П., Кирильчук А. М. Класифікація процесів, що спричиняють деградацію земельних угідь. *Агроекономічний журнал*. 2022. № 3. С. 150-159. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266420>
3. Сакун А. О., Кутковий Д. О. Оцінка впливу наслідків військових дій на ґрунти. *Екологічні науки*. 2025. № 1 (58). С. 350-353. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.56>
4. Кучер А. В. Методологічні засади оцінювання впливу бойових дій на ґрунти в контексті продовольчої безпеки. *Актуальні проблеми економіки*. 2024. № 9 (279). С. 245-262. URL: https://eco-science.net/wp-content/uploads/2024/09/9.24._topic_Anatolii-Kucher-245-262.pdf (дата звернення: 21.10.2025).
5. Юхно В. Моніторинг земель забруднених внаслідок воєнних дій. BUILD MASTER CLASS 2024: Conference Proceedings of the International Scientific-Practical Conference of Young Scientists. С. 121-122. <https://doi.org/10.59647/978-617-520-936-3/1>
6. Гончарова А. Є. Вплив війни на ґрунт і сільськогосподарські землі: бібліометричний аналіз та вдосконалення методів оцінки збитку. *Збалансоване природокористування*. 2024. № 4. С. 87-97. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2024.319356>
7. Оцінка стану ґрунтового покриву України у 2023–2024 рр. Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського НАН України. URL: https://www.iogu.gov.ua/link/press_center/magazines/magazine_2024.html (дата звернення: 21.10.2025).

8. Звіт про стан виконання у 2024 році Національного плану дій з охорони навколишнього природного середовища на період до 2025 року, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2021 р. № 443. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2025/03/Zvit-po-vykonannyu-NPD-za-2024.pdf> (дата звернення: 21.10.2025).
9. Білик О. І. Перспективи розвитку земельних відносин в умовах воєнного стану в Україні. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: право, публічне управління та адміністрування*, 2025. № 16. <https://doi.org/10.54929/2786-5746-2025-16-01-07>
10. 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. № 10. <https://doi.org/10.3390/land13101614>
11. Eslami E., Seyed Joodat S.H. Bioremediation of Oil and Heavy Metal Contaminated Soil – Case Study. ArXiv. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.03717>
12. Splodytel A., Holubtsov O., Chumachenko S., Sorokina L. The impact of Russia's war against Ukraine on the state of the country's soil Analysis results. *Ecoaction Centre for Environmental Initiatives*. 2023. Report. URL: <https://en.ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/05/Impact-of-war-on-soil-Ecoaction.pdf> (дата звернення: 21.10.2025).
13. Bonchkovskiy O. War-induced Soil Disturbances in North-Eastern Ukraine and Secondary Geomorphic Processes. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 964. 178594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
14. Altoff P.S., Thien S.J. Impact of M1A1 Main Battle Tank Disturbance on Soil Quality, Invertebrates, and Vegetation Characteristics. *Journal of Terramechanics*. 2005. № 42. P. 159-176. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.014>
15. Perez-Reche F.J., Taraskin S.N., Otten W., et al. Prominent Effect of Soil Network Heterogeneity on Microbial Invasion. ArXiv. 2012. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.098102>
16. Kucher, A. Ukrainian black soils in war: assessing the impact of hostilities on violations of the guidelines for sustainable soil management. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2025. Vol.11. N 2. P. 341–369. <https://doi.org/10.51599/are.2025.11.02.12>
17. Leal Filho W., et al. The Impacts of the War on the Preservation Areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 364. 121399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121399>
18. Didenko N.O. Soil Damage and Recovery in Ukraine: Lessons from Global Post-War Experiences. *Land Reclamation and Water Management*. 2024. № 2. P. 79-90. <https://doi.org/10.31073/mivg202402-391>
19. Lal R. Деградація и загрязнение почвы как глобальная чрезвычайная ситуация в области общественного здравоохранения. *Архив медицинских исследований*, 2025. 13(5). <https://doi.org/10.18103/mra.v13i5.6474>
20. Handelsman J., Cohen K. A World Without Soil: The Past, Present, and Precarious Future of the Earth Beneath Our Feet. Yale University Press, 2021. 320 p. <https://doi.org/10.12987/9780300263107>

Отримано: 25.10.2025 / Переглянуто: 26.11.2025 / Прийнято: 29.11. 2025 / Опубліковано: 30.12. 2025

A. O. POPSUY,

¹Non-Key Expert, ²Phd Student of the Department of Ecology,

E-mail: artem.ol.popsui@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0898-5873>

¹NIRAS Sweden AB

Hantverkargatan 11B, 112 21 Stockholm, Sweden

²Polish National University

Stary Boulevard, 7, Zhytomyr, 10008. Ukraina

METHODOLOGICAL BASIS FOR SYSTEMATIC ANALYSIS OF MILITARY SOIL DEGRADATION

Purpose. To substantiate the methodological foundations of the systematic analysis of degradation processes in soils of military origin and to form an integrated model for assessing their condition, dynamics and forecasting restoration. The scientific need for the creation of an interdisciplinary monitoring system combining geochemical, physical-mechanical, microbiological and landscape-analytical approaches is identified.

Methods. Mathematical modeling, statistical analysis and machine learning systems were used to process and generalize data, which provided a comprehensive assessment of the impact of military factors on the condition of soils.

Results. The study used system-ecological and geoinformation approaches, methods of toxicological analysis, remote sensing, as well as index assessment of degradation processes using integral indicators - the index of ecological soil degradation (IEDS), the index of structural-biological stability (ISBS) and the coefficient of military-technogenic load (WTC). It has been proven that the degradation of soils of military origin has a cascading nature: primary mechanical damage causes secondary processes - compaction, erosion, reduced water permeability, loss of microbiological activity and structural stability. According to the results of the analysis, it was established that in areas of active hostilities, the concentrations of toxic elements exceed the maximum permissible values by 5–12 times, and microbiological activity decreases by 35–65%. The developed system model allows identifying territories with the highest level of degradation, predicting further changes in the state of soils and forming priorities for reclamation. The combination of GIS mapping, bioindication and analytical modeling creates a scientific basis for ecological and management decisions in the field of post-conflict recovery.

Conclusions. The proposed methodological scheme of system analysis is an effective tool for assessing degradation processes in soils of military origin. It provides integration of multi-level environmental data, contributes to the formation of adaptive reclamation strategies and increases the efficiency of state environmental monitoring. The use of such a system will minimize social and environmental risks, preserve agricultural landscapes and support sustainable development of affected areas.

KEYWORDS: soil degradation, military origin, system analysis, integral degradation index, reclamation, geographic information systems, microbiological activity

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. Berezhniak, Ye. M. Naumovska, O. I. & Berezhniak, M. F. (2022). Degradation processes in the soils of Ukraine and their negative consequences for the environment. *Biological Systems: Theory and Innovation*, 13(3-4), 96-109. [https://doi.org/10.31548/biologiya13\(3-4\).2022.014](https://doi.org/10.31548/biologiya13(3-4).2022.014) (in Ukrainian).
2. Zaitsev, Yu. O. Sobko, V. I. Kozhevnikova, V. L. Lobanova, O. P. & Kyrylchuk, A. M. (2022). Classification of processes causing land degradation. *Agro-Economic Journal*, (3), 150-159. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266420> (in Ukrainian).
3. Sakun, A. O. & Kutkovyi, D. O. (2025). Assessment of the impact of military actions on soils. *Ecological Sciences*, (58), 350-353. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.56> (In Ukrainian).
4. Kucher, A. V. (2024). Methodological principles of assessing the impact of hostilities on soils in the context of food security. *Actual Problems of Economics*, (9(279)), 245-262. Retrieved from https://eco-science.net/wp-content/uploads/2024/09/9.24._topic_Anatolii-Kucher-245-262.pdf (In Ukrainian).
5. Yukhno, V. (2024). Monitoring of lands contaminated as a result of hostilities. *International Scientific-Practical Conference of Young Scientists «Build-Master-Class-2024»*, 121-122. <https://doi.org/10.59647/978-617-520-936-3/1> (In Ukrainian).
6. Honcharova, A. Ye. (2024). The impact of war on soil and agricultural land: bibliometric analysis and improvement of damage assessment methods. *Balanced Nature Management*, (4), 87-97. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2024.319356> (In Ukrainian).
7. Assessment of the state of Ukraine's soil cover in 2023-2024. *Institute of Soil Science and Agrochemistry Named after O. N. Sokolovskyi of NAS of Ukraine*. Retrieved from https://www.iogu.gov.ua/link/press_center/magazines/magazine_2024.html (In Ukrainian).
8. Report on the implementation in 2024 of the National Action Plan for Environmenta. *Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine*. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2025/03/Zvit-po-vykonannyu-NPD-za-2024.pdf> (In Ukrainian).
9. Bilyk, O. I. (2025). Prospects for the development of land relations under martial law in Ukraine. *Problems of Modern Transformations*, (16). <https://doi.org/10.54929/2786-5746-2025-16-01-07> (In Ukrainian).
10. 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*, (10). <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/10/1614>
11. Eslami, E. & Seyed Joodat S.H. (2018). *Bioremediation of Oil and Heavy Metal Contaminated Soil – Case Study*. *ArXiv*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.03717>
12. Splodytel A., Holubtsov O., Chumachenko S., Sorokina L. (2023). The impact of Russia's war against Ukraine on the state of the country's soil Analysis results. *Ecoaction Centre for Environmental Initiatives*. Retrieved from <https://en.ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/05/Impact-of-war-on-soil-Ecoaction.pdf>

13. Bonchkovskyi, O. (2025). *War-induced Soil Disturbances in North-Eastern Ukraine and Secondary Geomorphic Processes*. *Science of the Total Environment*, 964. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
14. Altoff, P.S. & Thien, S.J. (2005). Impact of M1A1 Main Battle Tank Disturbance on Soil Quality, Invertebrates, and Vegetation Characteristics. *Journal of Terramechanics*. (42), 159-176. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.014>
15. Perez-Reche, F.J. Taraskin, S.N. Otten, W. et al. (2012). *Prominent Effect of Soil Network Heterogeneity on Microbial Invasion*. *ArXiv*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.098102>
16. Kucher, A. (2025). Ukrainian black soils in war: assessing the impact of hostilities on violations of the guidelines for sustainable soil management. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, 11(2), 341–369. <https://doi.org/10.51599/are.2025.11.02.12>
17. Filho, W. L., Fedoruk M., Pires Eustachio J-H. P., Splodytel A., Smaliychuk A., Szykowska-Jóźwik M.I. (2024). The Impacts of the War on the Preservation Areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*, 364. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121399>
18. Didenko, N.O. (2024). Soil Damage and Recovery in Ukraine: Lessons from Global Post-War Experiences. *Land Reclamation and Water Management*. (2), 79-90. <https://doi.org/10.31073/mivg202402-391>
19. Lal R. (2025). Soil Degradation: A Public Health Emergency. *EMedical & Science Perspectives*, 13(5). <https://doi.org/10.18103/mra.v13i5.6474>
20. Handelsman, J. & Cohen, K. A (2021). *World Without Soil: The Past, Present, and Precarious Future of the Earth Beneath Our Feet*. *Yale University Press*, 2021, 320. Retrieved from <https://dokumen.pub/a-world-without-soil-the-past-present-and-precarious-future-of-the-earth-beneath-our-feet-9780300263107.html>

Submission received: 25.10.2025 / Revised: 26.11.2025 / Accepted: 29.11. 2025 / Published: 30.12. 2025