


УДК 631.452/.5:60:355.01-024.76(477)

## Напрями та технології відтворення родючості ґрунтів в Україні в післявоєнний період

Чайка Т.О.<sup>1</sup> , Короткова І.В.<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Полтавське відділення Академії наук технологічної кібернетики України

<sup>2</sup> Полтавський державний аграрний університет

 Чайка Т. О. E-mail: chaika\_ta@ukr.net



Чайка Т.О., Короткова І.В. Напрями та технології відтворення родючості ґрунтів в Україні в післявоєнний період. «Агробіологія», 2023. № 1. С. 142–156.

Chaika T., Korotkova I. Directions and re-production soil fertility technologies in the post-war period in Ukraine. «Agrobiology», 2023. no. 1, pp. 142–156.

Рукопис отримано: 10.05.2023 р.

Прийнято: 20.05.2023 р.

Затверджено до друку: 25.05.2023 р.

doi: 10.33245/2310-9270-2023-179-1-142-156

Стаття присвячена дослідженню негативних наслідків воєнних дій на стан родючості ґрунтів в Україні та напрямам їх відтворення. Актуальність теми полягає в тому, що третина оброблюваних сільськогосподарських земель постраждала від воєнних дій, що, з урахуванням аграрного напрямку виробництва східних і південних областей України, загрожує значним зменшенням вирощування сільськогосподарської продукції.

Метою статті є обґрунтування ефективності технологій відтворення родючості ґрунтів від наслідків воєнних дій в Україні.

Встановлено негативні наслідки від війни для структури ґрунту та його властивостей, відтворення яких природним способом потребує сотні років. Визначено та описано основні типи порушень ґрунту, спричинених бойовими діями: модифікація структури ґрунту (утворення кратерів від бомб, ущільнення тощо) та хімічне забруднення (потрапляння забруднювальних речовин).

Враховуючи наявний існуючий досвід подолання наслідків воєнних дій щодо відтворення ґрунтів сільськогосподарського призначення, запропоновано певний порядок відтворення родючості ґрунтів з різними ступенями та причинами пошкодження. Розглянуто варіанти відтворення ґрунтів із порушенням природної цілісності генетичних горизонтів та способи усунення забруднення важкими металами (механічні, фізико-хімічні та біологічні).

Задля практичної реалізації запропонованих заходів виконано орієнтовний розрахунок витрат на відтворення родючості ґрунтів від наслідків воєнних дій в Україні. Визначено, що для відтворення властивостей ґрунтів та придатності їх у використанні в аграрному виробництві, найбільші витрати (без урахування гуманітарного розмінування) припадають на механічну меліорацію (81,8 %). При цьому, обсяг витрат залежить від кількості вирв від снарядів та їх калібру, та методів відтворення агрохімічних властивостей ґрунту.

Зазначено особливості правового регулювання у сфері збереження ґрунтів та охорони їх родючості, визначення шкоди, завданої землям і ґрунтам України внаслідок збройної агресії проти країни. Проведені розрахунки слугуватимуть головними доказами для компенсації розміру шкоди у позовах проти країни-агресора.

**Ключові слова:** токсичні елементи, бомботурбація, розмінування, базальтовий туф, біоремедіація, фіторемедіація.

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень.** За часів повномасштабного вторгнення країни-агресора на територію України тисячі гектарів родючих українських чорноземів зазнали руйнівного впливу внаслідок воєнних дій. Зокрема, ще на початку березня 2022 року приблизно 110053 км<sup>2</sup> земель сільсько-

господарського призначення знаходилися в межах ризикової зони, що становило понад 30 % усіх оброблюваних земель України. Відповідні дані наведені згідно з мапою землекористування Copernicus Global Land Service з використанням сучасних алгоритмів обробки даних дистанційного зондування Землі (рис. 1) [1].

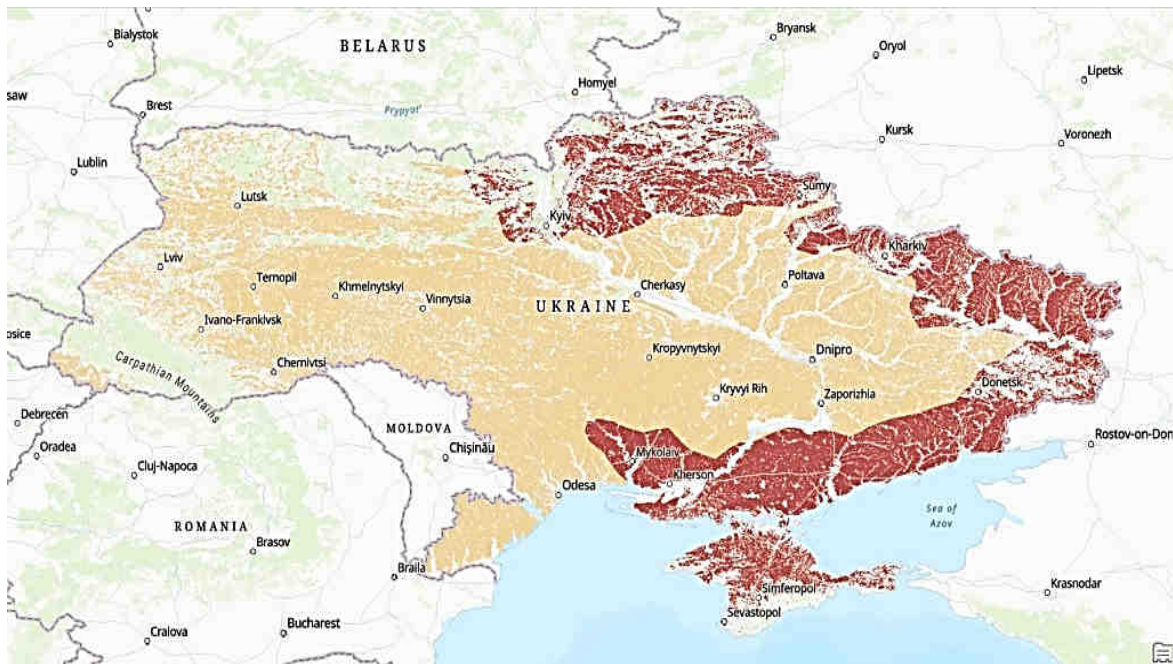


Рис. 1. Мапа агроландшафтів України, що постраждали внаслідок російської військової агресії (на 16.03.2022 р.).

**Примітка:** червоним кольором позначено агроландшафти України, які знаходяться в межах зони ризикового сільського господарства.

**Джерело:** дані [1].

Найбільш продуктивною частиною ґрунтового профілю, що піддається руйнівному впливу, є верхні горизонти ґрунту (біологічна ґрунтова кірка). Дослідження [2] свідчать, що ґрунтова кірка має важливе значення у стабілізації ґрунту та сприяє його родючості через насичення азотом і збільшення вмісту органічної речовини в ґрунті. Як показано в роботі [3], саме ця крихка кірка, що підтримує життя на ландшафті, втрачається, якщо антропогенна діяльність зумовлює: прискорену ерозію; збивання та змішування профілю (інверсія); пошкодження структури ґрунту через ущільнення; виснаження поживних речовин; забруднення ґрунту; зменшення проникнення води тощо. Автори [4] зазначають, що ущільнення ґрунту зменшує аерацію та гальмує появу сходів, ріст коренів і поглинання поживних речовин. На думку авторів [5, 6], усі ці наслідки загострюються під час війни через рух транспортних засобів, детонацію вибухонебезпечних боєприпасів тощо. Загалом, порушення стану ґрунтової поверхні через військові дії призводить до втрати різноманіття та біомаси верхнього родючого шару ґрунту.

Головне питання, що постає перед вченими та аграріями на сьогодні, як різні види порушень внаслідок військових дій впливають на

параметри ґрунту, сукцесію рослин і потенціал відтворення [7]. Зважаючи на те, що значна частина воєнних дій у 2022 році відбувалася в зоні найродючіших ґрунтів України і Європи, тому саме вони зазнали впливу забруднення й ерозії, що значною мірою негативно позначиться на сільськогосподарському виробництві в післявоєнні часи, зокрема на стані дикої природи.

Встановлено, що сучасні війни можуть спричинити такі екологічні порушення [8]:

- активізація екзогенних процесів (зсувів, ерозії схилів);
- забруднення поверхневих і підземних вод;
- коливання мікроклімату;
- забруднення повітря;
- порушення біологічного кругообігу речовин;
- руйнування інфраструктури, сільськогосподарського виробництва, промислового потенціалу, комунікацій;
- докорінна зміна стану природних комплексів.

Для повернення ґрунтів у використання необхідно розробити технології відтворення їх властивостей з урахуванням означених чинників. Цей процес є складним та тривалим і тому, незважаючи на те, що військові дії ще не

завершилися, починати його необхідно зараз, оскільки для їх відтворення знадобиться багато років, враховуючи, що глобальна середня швидкість утворення родючого шару ґрунту становить близько 0,06 мм/рік [9].

Для ефективного здійснення всіх заходів з відтворення родючості ґрунтів необхідний постійний моніторинг за їх дієвістю, який включає: аналіз адміністративних методів, плани коригувальних дій, витратність і очікувана рентабельність, довгострокові наслідки для екосистем.

**Мета дослідження** полягає в обґрунтуванні ефективності технологій відтворення родючості ґрунтів від наслідків воєнних дій в Україні.

**Матеріал та методи дослідження.** Для проведення дослідження використано системний підхід, завдяки якому здійснено формулювання проблеми відтворення родючості ґрунтів внаслідок негативного впливу воєнних дій і вибір ефективних технологій відтворення. Використання методологічної специфіки системного підходу дозволило дослідити закономірності та механізми утворення складного об'єкта з певних складових. Враховуючи багатofакторність негативного впливу воєнних дій на родючість ґрунтів, універсальність підходів цього методу визначило форми і напрями дослідження, що забезпечує формування практичних пропозицій. Застосування аналізу та синтезу дозволило виявити наявний стан родючості ґрунтів і визначити чинники негативного впливу на них воєнних дій, дослідити напрями відтворення їх родючості. Завдяки аналогії розглянуто світовий досвід і його практичне значення в умовах України. З урахуванням отриманої інформації за допомогою моделювання й аналітичного розрахунку виконано приблизний розрахунок витрат з відтворення родючості ґрунтів від наслідків воєнних дій в Україні.

**Результати дослідження та обговорення.** Влітку 2022 року значна кількість земель сільськогосподарського призначення у Херсонській, Запорізькій, Миколаївській та інших областях, що зазнали бомбардувань, постраждала від пожеж разом із урожаєм. Крім зазначених фізичних пошкоджень ґрунту, спостерігалось також хімічне забруднення внаслідок кожного вибуху снаряду. Як відомо, у виробництві військової зброї та вибухових речовин використовують хімічні сполуки, які не підлягають біологічному розкладанню, що створює реальну загрозу забруднення ґрунту та поверхневих вод, негативно впливає на біоту та екосистемні послуги, які використовують

люди (природні ресурси, природні умови життя біологічних видів, культурне значення природи для людей) [9]. Крім того, після потрапляння в навколишнє середовище більшість потенційно токсичних елементів із боеприпасів окислюється під впливом повітря, особливо у вологому середовищі. Через їх підвищену розчинність вони можуть стати мобільними/доступними для об'єктів навколишнього середовища, зокрема, спричинити потенційний вплив на людину через виникнення різного виду патологій [10]. Морфологія ґрунтів, що постраждали від військового впливу, також демонструє антропогенні зміни своїх особливостей.

Загалом можна виділити два основні напрями, де військові дії безпосередньо завдають шкоди ґрунту: модифікація механічної структури ґрунту та хімічне забруднення [11].

Не можна однозначно стверджувати, який тип порушень найбільш суттєвий за впливом на родючість ґрунтів. Фізичний вплив проявляється через попадання бомб та снарядів і супроводжується утворенням кратерів, які здатні виносити велику кількість ґрунту, утворюючи впадину. Ґрунт, що знаходиться в такій котловині, ущільнений, збурений, забруднений металевими уламками та попелом. Цей тип порушення ґрунту відомий під назвою «бомботурбація» включає витіснення вилученого ґрунту з котловини до її краю [8].

До порушення ландшафту призводить бомбардування, яке руйнує послідовність горизонтів і спричинює значну трансформацію рельєфу з очевидними наслідками для гідрології та родючості ґрунту. Закопані протитанкові та протипіхотні міни також зумовлюють порушення ґрунту, якщо вони вибухають. Фактично, установка міни може спричинити значне збурення ґрунту. Після її активації ґрунт навколо міни швидко забруднюється пластиковими та металевими осколками, а також залишками вибухових речовин [12]. Рух військової техніки, включаючи маневри колісної або гусеничної важкої техніки, також створює загрозу для стану ґрунту.

Основним негативним впливом військового транспорту на ґрунт є ущільнення (рис. 2), яке значно змінює гідравлічні властивості ґрунту, а також робить ґрунти більш вразливими до ерозії та стоку [12].

Змінені фізичні властивості ґрунту внаслідок ущільнення можуть змінити рухливість поживних елементів і цикли азоту та вуглецю на користь більших викидів парникових газів у вологих умовах. Ущільнення ґрунту зменшує біорізноманіття ґрунту через зменшення мікробної біомаси, ферментативної активності, ґрунтової

фауни та наземної флори. Також ущільнення ґрунтів може вплинути на врожайність протягом п'яти років та призвести до її зниження від 10 до майже 60 % через ускладнення доступу поживних речовин до коренів рослин і перешкоджання проникненню води в ґрунт [13].

супутникових систем ідентифікації мін. За попередніми розрахунками Київської школи економіки, вартість обстеження земель із високим ризиком мінного забруднення та розмінування постраждалих територій оцінюється в 436 млн дол. США, а вартість подальшої ре-

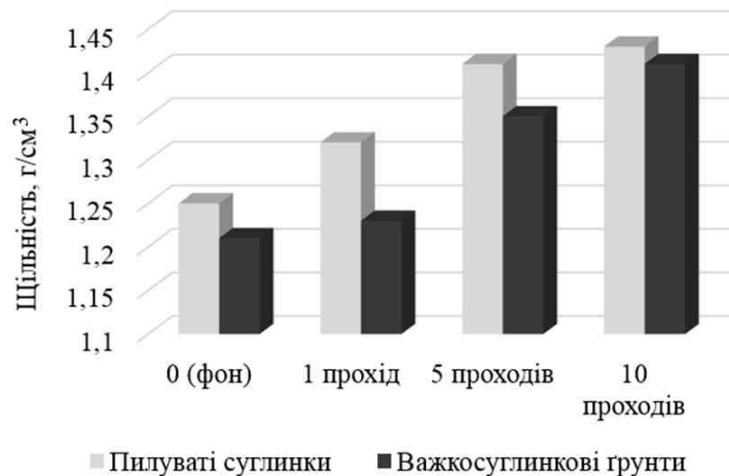


Рис. 2. Ступінь ущільнення різних типів ґрунтів від кількості проходів танка М1А1.

**Примітка:** танк М1А1 – модифікація танка Abrams, вагою 57,15 т.

**Джерело:** побудовано за [12].

Нині доступно декілька моделей, які дозволяють не лише оцінити ступінь ущільнення ґрунту внаслідок транспортного навантаження, а також розрахувати негативний вплив цього процесу на різні частини ґрунту, рослини та навколишнє середовище. Однак досі немає єдиної моделі для всіх типів ґрунтів [14].

Невід'ємною частиною наслідків будь-яких військових дій є хімічне забруднення ґрунтів, яке є більш характерним, ніж ущільнення. Хімічні порушення виникають внаслідок потрапляння в ґрунти таких забруднювальних речовин як паливно-мастильні матеріали, важкі метали, нітроароматичні вибухові речовини, фосфорорганічні нервово-паралітичні речовини, радіоактивні елементи [8].

Враховуючи зазначене вище, можна запропонувати певний порядок дій для відтворення родючості ґрунтів із різними ступенями й причинами пошкоджень (рис. 3).

За даними рисунка 3, початковим і одним із найважливіших заходів відтворення земельних угідь є гуманітарне розмінування. За прогнозами ООН, на розмінування українських територій, знадобиться, принаймні, від 5 до 7 років за умови використання новітніх

культивуванні земель із пошкодженим родючим шаром ґрунту – у 39,6 млн дол. США. Відомо, що, наприклад, Польщі, після Другої світової війни, знадобилося близько 12 років, щоб розмінувати території країни. У середині червня 2022 року кількість розмінованих територій нашої країни вже становила 2 мільйони гектарів, проте ще 30 мільйонів залишаються замінованими. Згідно з даними ООН, на сьогодні, Україна є однією з найбільш замінованих країн світу поруч з Афганістаном, Сирією та Боснією [15].

Варіантами відтворення земельних ділянок з порушенням природної цілісності генетичних горизонтів внаслідок ведення воєнних дій можуть бути такі [16]:

1. Вирівнювання поверхні через внесення чорнозему з урахуванням порядку шарів ґрунту, що має приблизно відповідати природному, з огляду на те, що найбільш родючим є верхній шар (20–30 см). Засипання в хаотичному порядку призведе до створення низькопродуктивних для сільськогосподарських культур ділянок, а їх відтворення потребуватиме здійснення додаткових заходів із внесення меліорантів, органічних добрив, фітомеліорації тощо.



Рис. 3. Етапи відтворення земельних угідь, що постраждали від воєнних дій.

**Джерело:** побудовано в результаті авторських досліджень.

2. Відтворення земельних ділянок природним способом (залишити без втручання) або через заліснення (висаджування кущів, дерев), оскільки відсутність рослинного покриву на цих ділянках підвищує їх ерозійну небезпеку. Такі ділянки, перебуваючи у стані спокою, здатні самостійно забезпечити відтворення рослинного покриву та родючості ґрунту, однак це досить тривалий процес.

Для його прискорення, у випадку використання територій під пасовища, доцільно декілька років поспіль висівати суміш бобово-злакових трав, наприклад, суміш ячменю й еспарцету (вирівнювальний посів). У перший рік ґрунт необхідно переорати та засіяти, а наступні роки – без оранки підсівати, «врізаючи» рядки. За можливості ґрунт необхідно удобрювати відходами тваринництва, перегноєм і звести до мінімуму використання хімічних речовин (добрив, стимуляторів росту тощо). Також доцільно вносити під оранку перед першим посівом культурних рослин біопрепарати на основі комплексу мікроорганізмів (молочно-

кислі та фототрофні бактерії, дріжджі, мікроміцети тощо), використання яких сприятиме відродженню корисної мікрофлори в ґрунті та поліпшить стан рослин, розвиток їх кореневої системи, що особливо важливо для формування структури ґрунту [15].

Якщо територію планують використовувати під посіви сільськогосподарських культур, після вирівнювання поверхні, проводять оранку й аналіз ґрунту пошарово – через кожні 20 см до глибини в один метр для проведення агрохімічної оцінки земельної ділянки на вміст основних елементів живлення. На основі отриманих результатів, проводять оптимізацію живлення через внесення добрив, переважно, природного походження (Ембіко, Граундфікс, Азотофіт-р, МікоФренд-т, Меланоріз, 1r Seed Treatment, Гумісол-прима NPK тощо).

Одночасно із значною трансформацією рельєфу, на місці розриву снарядів, спостерігається досить високий рівень хімічного забруднення ґрунту. Тому після вирівнювання поверхні, насамперед, необхідно провести аналіз ґрунту

на вміст важких металів і токсичних речовин та оцінити придатність цієї території для сільськогосподарського використання. Подальші рішення щодо відтворення родючості ґрунту й цільового призначення ділянки ухвалюють залежно від отриманих результатів аналізу [16].

Хімічне забруднення ґрунтів внаслідок воєнних дій доцільно розглядати з таких позицій: забруднення вибуховими речовинами, потенційно токсичними елементами (важкими металами) та іншими елементами. Представниками вибухових речовин є переважно нітроароматичні сполуки: 2,4,6-тринітротолуол, гексагідро-1,3,5-тринітро-1,3,5-тріазин, октагідро-1,3,5,7-тетранітро-1,3,5, 7-тетразоцин, нітрогліцерин, 1,3,5-тринітробензол, динітробензол, N-метил-N,2,4,6-тетранітроанілін і 2,4,6-тринітрофенол тощо. Ці сполуки зазвичай достатньо стабільні у ґрунті через внутрішню стійкість до випаровування, гідролізу та біодеградації [13].

З широкого спектру важких металів, із залишками зброї, в ґрунт потрапляють свинець, сурма, хром, нікель, цинк, кадмій, миш'як, ртуть, уран [17]. Найнебезпечнішим представником є, безумовно, свинець, який вивільняється з куль у великій кількості. Спочатку, за потрапляння у ґрунт, свинець може бути інертним, але потім, через зміну умов ґрунту (рН, вологість) стає реакційно здатним. Переважна більшість важких металів та їх сполук надзвичайно стійкі й залишаються в біосфері, створюючи джерело забруднення, потенційно шкідливе для людини та навколишнього середовища [18].

Поряд з важкими металами в навколишнє середовище надходять також продукти окиснення вибухових речовин. Встановлено, що з 58 тонн вибухових речовин утворюється, наприклад, 70 тонн оксиду алюмінію, внаслідок окиснення порошкоподібного алюмінію, який разом із тротилом входить до складу вибухових речовин. Хімічний аналіз ґрунту на околицях м. Слов'янськ показав перевищення відносно фонових показників концентрації титану – у 150 разів, сульфатів – у 2,3 рази, кадмію – в 1,5 рази, свинцю – в 1,3 рази [16].

Найбільш суттєве перевищення вмісту важких металів спостерігається безпосередньо на місці утворення воронки від снарядів. Зокрема, вміст кадмію в пробі ґрунту з воронки навіть площею 12 м<sup>2</sup> (с. Заквітне) перевищував норму більш як у 9 разів, сульфатів – у 4 рази, концентрація ванадію та стронцію становила 100 і 150 мг/кг, відповідно. Ці речовини, як відомо, використовують в авіаційній і ракетній техніці, звідки і потрапляють в навколишнє середовище [19].

Враховуючи потенційну небезпеку важких металів щодо природних функцій ґрунту та біосфери через біоаккумуляцію в харчовому ланцюзі, необхідно, насамперед, вжити заходів з їх виявлення та утилізації. На сьогодні запатентоване технічне рішення (патент 56958 UA) [20] проведення моніторингу вмісту важких металів у ґрунтах, що використовують для вирощування культурних рослин. Розроблено кондуктометричний біосенсор, який включає селективну до важких металів ферментну систему інвертаза-мутаротаза-глюкозооксидаза (патент 25456 UA) [21] та мультибіосенсор (патент 26085 UA) [22], що складається з ферментів, відповідно, ацетилхолінестерази, бутерилхолінестерази, уреаз, глюкозооксидази, мутаротази-інвертази-глюкозооксидази, для селективного визначення їх вмісту в різних об'єктах довкілля.

На сьогодні відомо багато методів усунення забруднення важкими металами, серед них – механічні, фізико-хімічні та біологічні [23].

Механічні методи передбачають зняття забрудненої частини ґрунту й зберігання її на біотехнологічному звалищі досить тривалий час, оскільки термін напіврозпаду металів може становити понад 300 років. Крім того, наявність територій, придатних для сільськогосподарського використання через воєнні дії вкрай обмежена, тому, створення біотехнологічних звалищ потребуватиме додаткових площ і, тому, цей метод можна вважати недоцільним і непридатним.

Основу фізико-хімічних методів становлять комплекси сорбент-метал, які утворюються після внесення сорбуючих речовин, з подальшим вимиванням за допомогою розчинника. Ці методи характеризуються високою ефективністю видалення металів із ґрунту і є достатньо доступними за собівартістю.

Найбільш екологічно привабливим, економічно рентабельним і тому перспективним методом є використання різноманітних природних сорбентів, що дозволяє не лише очистити ґрунти від важких металів, а також значно покращити агрофізичні властивості ґрунтів і екологічний стан навколишнього середовища (патент 112025 UA) [24]. Як потужний природний сорбент можуть бути використані природні алюмосилікати – вулканічні туфи, що мають іонообмінні властивості та здатність сорбувати різні за походженням речовини. Це дозволяє використовувати їх як ентеросорбенти та основу для іммобілізації ферментів, токсинів тощо.

Важливого значення набувають біологічні способи очищення ґрунту від важких металів. Відповідно до концептуальної моделі [25]

біоремедіації ґрунтів передбачається використання класу біологічних методів ремедіації з градацією їх на групи:

– методи біонакопичення рослинами та/або перерозподілу забруднювачів у ґрунті за одночасного впливу на біологічну та косну складові ґрунту (мінеральні речовини, що є продуктами деструкції гірських порід і утворюються без участі живих організмів, компоненти біологічного колообігу). Це приводить до оптимізації екологічного стану ґрунту завдяки збільшенню вмісту органічної речовини і її зв'язуванню глинистими мінералами та поліпшення структурного стану ґрунту, трофічного й газового режимів, властивостей ґрунтової системи загалом;

– методи біодеградації забруднювачів за використання мікроорганізмів.

До першої групи методів належить фіторемедіація, яка передбачає використання рослин, що концентрують забруднювальні речовини в своїх тканинах [26]. Вилучають забруднювальні речовини через збір врожаю рослин. Процес можна посилити за допомогою змін у ґрунті, які підвищують доступність елементів важких металів для рослин [27]. Ефективність фіторемедіації залежить від багатьох чинників, зокрема здатності рослин та пов'язаних з ними мікроорганізмів перехоплювати, поглинати, накопичувати та/або розкласти забруднювальні речовини.

На сьогодні в Україні є достатня кількість запатентованих способів фіторемедіації забруднених ґрунтів із застосуванням:

1) технічних олійних культур – ріпаку (*Brassica napus* L.) або суріпиці (*Barbarea vulgaris* R. Br.), або тифону (*Brassica rapa*), як рослин-аккумуляторів важких металів (патент 50789 UA) [28], висів і вирощування рослин родини *Gramineae* (насадження кукурудзи (*Zea mays* L.) або пшениці (*Triticum* L.)) з подальшим скошуванням їх фітомаси та її утилізації (патент 76416 UA) [29];

2) амброзії полинолистої та трироздільної (*Ambrosia artemisiifolia* L., *Ambrosia trifida* L.), яку збирають до набуття повної фази цвітіння (патент 4726 UA) [30], однак її використання має обмеження через алергічну дію на людей;

3) газонної трави за попередньої обробки насіння розчином гумінового стимулятора-адаптогена (патент 45299 UA) [31], наприклад, Гумісол-прима, Гуміам 06 тощо;

4) стрес-толерантних трансгенних рослин *Triticum* L. до дії важких металів (патент 90279 UA) [32].

Незважаючи на переваги, фіторемедіація має низку недоліків: високі концентрації поллютантів у середовищі можуть бути токсич-

ними для рослин і мікроорганізмів, забруднювальні речовини мають бути біологічно доступними для рослин, процес очищення може займати великий проміжок часу [33].

Тривалими в часі є також методи біоремедіації, які засновані на здатності різних груп живих організмів у процесі життєдіяльності розкласти або акумулювати у своїй біомасі забруднювачі (важкі метали, радіонукліди, азотні, фосфорні та органічні сполуки тощо). За умови відтворення життєздатності й видової розмаїтості природного мікробіоценозу ґрунту біологічні методи є ефективними, проте сам процес очищення забрудненого ґрунту досить повільний і тривалий [27]. Розроблено спосіб вирощування сільськогосподарських культур на ґрунтах, забруднених радіонуклідами і/або важкими металами (патент 25274 UA) [34], що передбачає передпосівну обробку ґрунту та насіння за допомогою його дражування біогумусом черв'яка. Запропоновано використання біогумусу червоного каліфорнійського черв'яка або біогумусу дощового черв'яка разом із природним сапропелем у складі агроекологічного препарату «Біокольчуга» (патент 25456 UA) [21]. Доведена ефективність застосування натурального біогумусу й глауконіту за співвідношення компонентів 50–90 та 50–10 вагових відсотки (патент 34132 UA) [35]. Описаний спосіб використання промислового препарату «Гумівіт», як складової суміші, яка підвищує вміст ґрунтових мікроорганізмів (патент 38149 UA) [36]. Для фіторекультивації техногенно забруднених і збіднених ґрунтів розроблено біопрепарат комплексної дії, який одержано з культуральної рідини *Pseudomonas* sp. PS-17, вирощеної на оптимізованому поживному середовищі, з подальшою стерилізацією отриманої культуральної рідини та видаленням осаду клітин (патент 77228 UA) [37].

Включення до технологій очищення техногенно забруднених територій одного з методів біоремедіації ґрунтів має базуватись на [25]:

1) особливостях властивостей ґрунтів і ступені його пошкодження військовими діями;

2) обґрунтованому спектрі рослин, сівозмін, культур фітоценозів, що є придатними для використання, як фітомеліорантів за різних рівнів і прояву забруднення ґрунтів різного генезису;

3) використанні ефективних мікробних і ферментних препаратів, дослідженні їх впливу на властивості ґрунту, на здатність до біодеградації важких металів;

4) проведенні еколого-економічного оцінювання ефективності використання біологічних методів ремедіації ґрунтів для ефективного менеджменту ґрунтовими ресурсами.

У більшості випадків ґрунти, що знаходяться в зоні бойових дій, відновлюють свої первинні характеристики та функціональність після припинення військових дій, з різною швидкістю відтворення залежно від типів та властивостей ґрунту. Іноді, однак, порушення настільки значні, що необхідне втручання, спрямоване на зміну структури та очищення ґрунтів.

Для повного повернення забруднених та пошкоджених територій у сільськогосподарське використання необхідне відтворення їх родючості. Слід зауважити, що перевагу в обранні способів оптимізації живлення ґрунтів необхідно надавати таким, що передбачають використання природних речовин й препаратів органічного походження, зокрема у поєднанні з кремнієвмісними мінералами з природних джерел.

Як органічний матеріал доцільно застосовувати сапропель – природний біоматеріал, який використовують в сільському господарстві як біодобриво, що покращує структуру ґрунту та збільшує його продуктивність. Завдяки лужній реакції (рН = 9,8–10,2) сапропель ефективно знижує кислотність ґрунту, має високий вміст органічного азоту та фосфатів Са, К та Mg. Створення сумішей сапропелю й кремнієвмісних природних мінералів суттєво покращує агрофізичний, агрохімічний та біо-екологічний стан ґрунту [38].

Перспективним матеріалом для поліпшення родючості ґрунтів з урахуванням негативних наслідків війни є біовугілля (біочар) – багатий поживними речовинами матеріал, вироблений з біомаси. Біовугілля може покращувати сільськогосподарські ґрунти різними способами. Ці методи включають покращення водоутримувальної здатності, стабільності ґрунту завдяки високій адсорбції (усунення зі складу ґрунту окислів алюмінію), збільшення популяцій мікробіомів та контролю популяцій грибів, зменшення потреби в добривах та зменшення вививання добрив [39]. За доповнення ґрунтів біовугіллям, у ґрунтовій матриці відбувається більша кількість окисно-відновних реакцій. До переваг біовугілля слід віднести стійкість в навколишньому середовищі та ґрунті, що виключає його повторне нанесення (завдяки хімічній інертності він не підлягає деструкції протягом тисячоліть) [40].

Незважаючи на те, що біовугілля виробляють за технологією гідротермальної карбонізації, його застосування в сільському господарстві забезпечує довгострокові економічні вигоди. Економічна оцінка, проведена авторами роботи [41], довела, що застосування біовугілля для сільськогосподарських цілей з імовірністю 99 % є прибутковим.

Важливим чинником агроєкосистем, що сприяє відновленню родючості ґрунтів, зростанню й розвитку рослинного покриву, є мікробіота. Ґрунтові мікроорганізми виконують різноманітні екологічні функції, основними з яких є забезпечення певних етапів кругообігу біогенних елементів та підтримка гомеостазу біогеоценозу. Вони теж зазнають шкоди під час військових дій, наприклад, під час вибуху, який спричиняє теплову та вогневу дію на ґрунт, або через пожежі на полях. Також залишки сірчаного порошку (від пострілу стрілецької зброї та вибуху авіабомби) з часом в контакт з опадами утворюють сульфатну кислоту, яка знищує мільйони організмів, що формують покривний шар ґрунту [42]. Однак, мікробіота не може зв'язувати важкі метали, оскільки вони є для неї токсичними речовинами. Тому, можна запропонувати використання препаратів мікробних поверхнево-активних речовин, синтезованих різними штабами-продуцентами [43]. Такі позаклітинні метаболіти переводять важкі метали з однієї форми в іншу, змінюючи рівень токсичності, та розкладаються природною мікробіотою. Вартість таких препаратів більша за їх хімічні аналоги, проте вони більш безпечні та ефективніші [44].

Доведена ефективність сумісного використання біологічного препарату Органік Баланс та препарату Граундфікс (мобілізатора фосфору і калію). Ці препарати здатні зменшити надходження свинцю до рослинного організму на 20–30 %, а кадмію – на 50 %. Однак, їх дієвість залежить від властивостей ґрунту, зокрема, якщо ґрунт попередньо провапнований і багатий фосфором та калієм. До таких ґрунтів належать ґрунти з нейтральною або слаболужною реакцією. Для ґрунтів Полісся необхідно проводити меліоративні заходи [45].

Значну перевагу над усіма означеними матеріалами, що запропоновані для поліпшення поживних властивостей ґрунтів, мають, безумовно, гумінові кислоти та препарати гумінового походження. Гумінові сполуки вже понад десятиліття почали додавати в ґрунт у різних регіонах світу, щоб вирішити проблему підвищення якості ґрунтів [46–48].

Використання гуматів, як стратегії рекультиваци, має ряд переваг порівняно з використанням мікроорганізмів, включаючи підвищену змочуваність ґрунту водою, меншу потребу в кисні, простоту застосування та нижчу вартість. Встановлено, що гумінові речовини позитивно впливають на якість і родючість ґрунту через підвищення його вологоутримувальної здатності, стабілізації структури ґрунту, мікробної діяльності ґрунту, фізіології рослин. Гумати



зменшують ерозію ґрунту завдяки збільшенню когезійних сил дрібних частинок ґрунту. За наявності достатньої кількості азоту гумінові кислоти та фульвокислоти сприяють мікробній активності. Гумінові сполуки та мікроорганізми використовують, як кінцеві акцептори електронів, для зниження біодоступності металів через пригнічення перенесення електронів на  $\text{CO}_2$ , зменшення виробництва  $\text{CH}_4$  в безкисневих умовах. Однак, однією з найважливіших характеристик гумінових речовин є їх здатність взаємодіяти з іонами металів, включаючи токсичні забруднювачі, через утворення водорозчинних та нерозчинних у воді комплексів. Завдяки утворенню таких комплексів вони можуть розчиняти, мобілізувати та транспортувати метали в ґрунтах і водах, що сприяє зниженню токсичності ґрунтів [49].

Враховуючи проведений огляд негативних наслідків воєнних дій на стан і властивості ґрунтів України та технологічні заходи щодо їх повернення у сільськогосподарське використання, нами запропоновано перелік заходів і виконано приблизний розрахунок витрат щодо їх відтворення на прикладі території площею 3,01 га (с. Степанівка Шахтарського району Донецької області) [50]. Попередньо територія

була обстежена за допомогою супутникових знімків на наявність вивв від снарядів, їх кількість, розміри та визначення калібру снарядів. Це дозволило здійснити попередню оцінку розмірів кратерів, їх типи, можливе хімічне забруднення, кількість вивв тощо. Узагальнені витрати на здійснення необхідних заходів щодо відтворення наведено у таблиці 1.

Критеріями для ухвалення рішення щодо варіанта технологічних заходів з відтворення поживних властивостей ґрунтів є показники вмісту основних макро- й мікроелементів та фінансова складова. Тому, нами запропоновано використання комплексного органо-мінерального добрива Гумат калію «Нітрогумат Євро», який виробляє Науково-інноваційний комплекс «Екологія» (ПП НІК «Екологія»). Вміст основних компонентів у добриві: гумінові та фульвокислоти – 40 %, калій – 5 %, повний набір амінокислот, органічні хелатоутворюючі кислоти, силікатна кислота, вуглець (форми, доступні для ґрунтової мікрофлори), що дозволяє формувати ґрунтовий гумус, і повний спектр макро- та мікроелементів. Оскільки дослідні ґрунти можна вважати такими, що мають низький вміст гумусу, то норма внесення має бути не менше 1 т/га.

Таблиця 1 – Витрати на відтворення земель для ведення сільськогосподарської діяльності

Стаття витрат	Сума, грн	Частка у структурі витрат, %
Екологічний аналіз на забруднювачі (рН, свинець, кадмій, цинк, мідь, нікель, хром загальний, марганець, кобальт, радіаційний фон, ртуть, миш'як, сурма, ванадій, амоній, нітрати, хлориди, сірка, формальдегід, феноли)	5900,0	0,5
<b>Механічна регенерація</b>		
Чорнозем для засипання 379 вивв від снарядів, 3835,59 м <sup>3</sup>	767078	69,9
Механічні роботи для регенерації земель із залученням бульдозерів 132 кВт (180 к.с.) і самоскидів МАЗ 551605	131000	11,9
<b>Агрохімічна рекультивация</b>		
Гранульоване вапно для вапнування ґрунту, 13,55 т	54200	4,9
Внесення гранульованого вапна трактором потужністю 300 кВт (407 к.с.)	13952	1,3
Добриво Гумат калію «Нітрогумат Євро», 3,01 т	120400	11,0
Внесення добрива розкидачем МВД-1000 в агрегаті з трактором МТЗ-80/82	4500	0,5
Всього витрат	1097030	100,0

**Примітки:** Вартість проведення розмінування не включена до розрахунків, оскільки завдяки волонтерському проекту Military.feodal.online фермер може залишити заявку на безкоштовне гуманітарне розмінування [51]. На початок 2023 р. вартість розмінування становила 3–4 дол. США за 1 м<sup>2</sup>, що з урахуванням площі обраної ділянки у 3,01 га становить 90,3–120,4 тис. дол. США.

**Джерело:** авторські розрахунки.

Отже, для відтворення властивостей ґрунтів і придатності їх у використанні в аграрному виробництві, найбільші витрати (без урахування гуманітарного розмінування) припадають на механічну меліорацію – 81,8 %, з яких 85,5 % – витрати на чорнозем для вирівнювання ландшафту. Обсяг цих витрат, безпосередньо, залежить від кількості виливів від снарядів і їх калібру, та варіанта відтворення поживних властивостей ґрунту.

Доцільно додати, що правове регулювання у сфері збереження ґрунтів та охорони їх родючості здійснює Верховна Рада України, Кабінет Міністрів України, Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, Державна екологічна інспекція, органи місцевого самоврядування, місцеві державні адміністрації та спеціально уповноважені центральні органи виконавчої влади в межах повноважень, установлених законодавством, відповідно до Конституції України, Земельного кодексу України, Законів України «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про охорону земель», «Про державний контроль за використанням та охороною земель» та «Про землеустрій», інших нормативно-правових актів [16].

У квітні 2022 року Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України затвердило й опублікувало методичку, за якою держава розраховуватиме шкоду, завдану землям і ґрунтам України внаслідок збройної агресії проти України (Наказ № 167 від 04.04.2022 р.) [52]. Розмір шкоди визначатимуть уповноважені посадові особи Державної екологічної інспекції, які встановлюватимуть факти забруднення ґрунтів та/або засмічення земель, їх масштаби.

Уповноважені органи Державної екологічної інспекції формують усі матеріали, що використовують для проведення розрахунку, в окрему справу. Копії розрахунків разом з матеріалами справи будуть надавати органам державної влади, місцевого самоврядування та правоохоронним органам. Зазначені розрахунки слугуватимуть головними доказами розміру шкоди, завданої ґрунтам і землям України внаслідок російської агресії. Вони будуть представлені міжнародним судовим інституціям у позовах проти країни-агресора задля компенсації втрат постраждалим особам. Також ці розрахунки можуть бути використані правоохоронними, судовими органами у процесі досудового розслідування та судового розгляду екологічних злочинів, вчинених країною-агресором на території України [53].

**Висновки.** Ведення активних і тривалих воєнних дій на території України призводить до погіршення деяких важливих властивостей ґрунтів, що може призвести до виведення їх із сільськогосподарського використання на тривалий час, а для їх відтворення знадобиться багато сотень років.

У зв'язку з цим розглянуто такі методи відтворення родючості ґрунтів – механічні, фізико-хімічні та біологічні. Механічні методи передбачають зняття забрудненої частини ґрунту й зберігання її на біотехнологічному звалищі досить тривалий час. Основу фізико-хімічних методів становлять комплекси сорбент-метал, які утворюються після внесення сорбуючих речовин, наприклад, вулканічних туфів. Серед біологічних способів розглянуто: біоремедіацію ґрунтів; застосування сапропелю та біочару; використання препаратів мікробних поверхнево-активних речовин, синтезованих різними штаммами-продуцентами, та препаратів гумінового походження.

Враховуючи проведене дослідження виконано орієнтовний розрахунок витрат на відтворення родючості ґрунтів від наслідків воєнних дій в Україні.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Майже третина українських полів може бути незасіяними або недоступними. 2022. URL: <https://uncg.org.ua/a-third-ua-crops>.
2. Warren S.D. Synopsis: Influence of biological soil crusts on arid land hydrology and soil stability. Biological soil crusts: Structure, function and management / J. Belnap, O.L. Lange (eds.). Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. P. 351–362.
3. Ayers P.D., Shaw R.B., Diersing V.E., Riper J.Van. Soil compaction from military vehicles. Presentation at the International Summer Meeting. Michigan-St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1990.
4. Demarais S., Tazik D.J., Guertin P.J., Jorgensen E.E. Disturbance associated with military exercises. Ecosystems of disturbed grounds / L.R. Walker (ed.). New York: Elsevier, 1999. P. 385–396.
5. Warren S.D., Eldridge D.J. Biological soil crusts and livestock in arid ecosystems: Are they compatible? Biological soil crusts: Structure, function and management / J. Belnap, O.L. Lange (eds.). Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. P. 403–417.
6. Belnap J., Eldridge D.J. Disturbance and recovery of biological soil crusts. Biological soil crusts: Structure, function and management / J. Belnap, O.L. Lange (eds.). Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. P. 365–386.
7. Kade A.N., Warren S.D. Soil and plant recovery after historic military disturbances in the Sonoran desert, USA. Arid Land Research and Management. 2002. Vol. 16(3). P. 231–243. DOI: 10.1080/153249802760284784.

8. 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.
9. Kiernan K. Geodiversity also needs protection during armed conflicts. 2020. URL: <https://ceobs.org/geodiversity-also-needs-protection-during-armed-conflicts>.
10. Human health risks related to the consumption of foodstuffs of plant and animal origin produced on a site polluted by chemical munitions of the First World War / S. Gorecki et al. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 599–600. P. 314–323. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.213.
11. Stadler T., Temesi Á., Lakner Z. Soil chemical pollution and military actions: a bibliometric analysis. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. 7138 p. DOI: 10.3390/SU14127138.
12. Althoff P.S., Thien S.J. Impact of M1A1 main battle tank disturbance on soil quality, invertebrates, and vegetation characteristics. *Journal of Terramechanics*. 2005. Vol. 42. P. 159–176. DOI: 10.1016/j.jterra.2004.10.014.
13. 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: 10.1016/j.earscirev.2013.08.009.
14. Nawaz M.F., Bourrié G., Trolard F. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2013. Vol. 33. P. 291–309. DOI: 10.1007/S13593-011-0071-8.
15. Реабілітація українських ґрунтів після війни коштуватиме сотні мільйонів доларів – експерти. 2022. URL: <https://superagronom.com/news/16200-reabilitatsiya-ukrayinskih-gruntiv-pislya-viyni-koshtuvatime-sotni-milyoniv-dolariv--eksperti>.
16. Воєнні дії на сході України – цивілізаційні виклики людству. Львів: ЕПЛ, 2015. 136 с.
17. Examining the effects of the destroying ammunition, mines, and explosive devices on the presence of heavy metals in soil of open detonation pit: Part 1 – Pseudo-total concentration / N.T. Tomic et al. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2018. Vol. 229. 301 p. DOI: 10.1007/s11270-018-3957-0.
18. Fayiga A.O. Remediation of inorganic and organic contaminants in military ranges. *Environmental Chemistry*. 2019. Vol. 16. P. 81–91. DOI: 10.1071/EN18196.
19. Войціховська А. Дослідження ЕПЛ впливу військових дій на довкілля на сході України. *Екологія. Право. Людина*. 2015. № 23–24(63–64). С. 57–59.
20. Спосіб управління міграцією біоелементів у системі «ґрунт – корми – організм курей-несучок – людина»: пат. 56958 Україна / Л.Г. Засипка та ін.; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2.
21. Кондуктометричний біосенсор для визначення концентрації іонів важких металів у водних розчинах: пат. 25456 Україна / О.О. Солдаткін та ін.; опубл. 10.08.2007, Бюл. № 12.
22. Абрамов С.М., Сопельник В.І. Агроекологічний препарат «біокольчуга»: пат. 26085 Україна; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 14.
23. Heavy metal speciation and health risk assessment of soil and jute mallow (*Corchorus Oloratus*) collected from a farm settlement in Ikorodu, Lagos, Nigeria / O.M. Makanjuola et al. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*. 2019. Vol. 8(4). P. 201–223. DOI: 10.4236/jacen.2019.84016.
24. Спосіб очищення ґрунтів від радіонуклідів, важких металів і пестицидів: пат. 112025 Україна / Р.Б. Гевко та ін.; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.
25. Самохвалова В.Л. Біологічні методи ремедіації ґрунтів, забруднених важкими металами. *Біологічні студії*. 2014. № 8 (1). С. 217–236. DOI: 10.30970/sbi.0801.337.
26. The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils / A. Sessitsch et al. *Soil Biology & Biochemistry*. 2013. Vol. 60. P. 182–194. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.01.012.
27. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field / J. Vangronsveld et al. *Environmental Science and Pollution Research*. 2009. Vol. 16. P. 765–794. DOI: 10.1007/s11356-009-0213-6.
28. Гавриляк М.Я., Баранов В.І. Спосіб очищення ґрунтів породного відвалу вугільних шахт від важких металів: пат. 50789 Україна; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12.
29. Корж О.П., Савченко І.Г., Гура Н.О. Фіторемедіаційний спосіб очищення ґрунтів від важких металів: пат. 76416 Україна; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.
30. Дронь М.М., Чмиленко Ф.О., Смітюк Н.М. Спосіб очищення техногенно забруднених ґрунтів від важких металів: пат. 4726 Україна; опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2.
31. Бутюгін О.В., Узденніков М.Б., Гнеденко М.В. Спосіб рекультивації териконів: пат. 45299 Україна; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.
32. Макнейл С., Чемберлейн Д., Боувер Р. Стрес-толерантна трансгенна рослина пшениці: пат. 90279 Україна; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8.
33. Dermont G., Bergeron M., Mercier G., Richer-Lafèche M. Metal-contaminated soils: remediation practices and treatment technologies. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. 2008. Vol. 12(3). P. 188–209. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-025X(2008)12:3)188.
34. Абрамов С.М., Сопельник В.І. Спосіб вирощування сільськогосподарських культур на ґрунтах, забруднених радіонуклідами і/або важкими металами: пат. 25274 Україна; опубл. 10.08.2007, Бюл. № 12.
35. Абрамов С.М., Сопельник В.І., Сопельник К.В. Органомінеральне пастоподібне добриво: пат. 34132 Україна; опубл. 25.07.2008, Бюл. № 14.
36. Бутюгін О.В., Узденніков М.Б., Зубкова Ю.М., Гнеденко М.В. Спосіб рекультивації териконів: пат. 38149 Україна; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.
37. Препарат комплексної дії для використання у сільському господарстві та рекультивації техногенно змінених ґрунтів: пат. 77228 Україна / О.В. Карпенко та ін.; опубл. 11.02.2013, Бюл. № 3.

38. Murunga S.I., Wafula E.N., Sang J. The Use of Freshwater Sapropel in Agricultural Production: A New Frontier in Kenya. *Advances in Agriculture*. 2020, 8895667. DOI: 10.1155/2020/8895667.

39. Allohverdi T., Mohanty A.K., Roy P., Misra M. A review on current status of biochar uses in agriculture. *Molecules*. 2021. Vol. 26(18). 5584 p. DOI: 10.3390/molecules26185584.

40. Karthik A., Hussainy S.A.H., Rajasekar M. Comprehensive study on biochar and its effect on soil properties: a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2020. Vol. 9(05). P. 459–477. DOI: 10.20546/ijcmas.2020.905.052.

41. Keske C., Godfrey T., Hoag D.L., Abedin J. Economic feasibility of biochar and agriculture coproduction from Canadian black spruce forest. *Food and Energy Security*. 2019. Vol. 00. e118. DOI: 10.1002/fes3.188.

42. Linking oxidative and salinity stress tolerance in barley: can root antioxidant enzyme activity be used as a measure of stress tolerance / M.J. Dragišić et al. *Plant and Soil*. 2013. Vol. 365(1–2). P. 141–155.

43. Lopes C., Herva M., Franco-Uria A., Roca E. Inventory of heavy metal content in organic waste applied as fertilizer in agriculture: evaluating the risk of transfer into the food chain. *Environmental Science and Pollution Research*. 2011. Vol. 18(6). P. 918–939. DOI: 10.1007/s11356-011-0444-1.

44. Biosurfactant technology for remediation of cadmium and lead contaminated soils / A. Juwarkar et al. *Chemosphere*. 2007. Vol. 68. P. 1996–2002. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.02.027.

45. Гусарова А. Мікробні продукти можуть знизити вплив важких металів на рослини у разі забруднення ґрунтів. 2022. URL: <https://superagronom.com/news/16438-mikrobnii-produkti-mojut-zniziti-vpliv-vajkih-metaliv-na-roslini-u-razi-zabrudnennya-gruntiv>.

46. Rashad M., Hafez M., Popov A.I. Humic substances composition and properties as an environmentally sustainable system: A review and way forward to soil conservation. *Journal of Plant Nutrition*. 2022. Vol. 45(7). P. 1072–1122. DOI: 10.1080/01904167.2021.2005801.

47. Bhatt P., Singh V.K. Effect of humic acid on soil properties and crop production – A review. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 2022. Vol. 92(12). P. 1423–1430. DOI: 10.56093/ijas.v92i12.124948.

48. Короткова І.В., Чайка Т.О. Роль гумінових препаратів та їх сумішей з мінеральними добривами в технологіях вирощування пшениці озимої. Екологоорієнтовані підходи відновлення техногенно забруднених територій і створення сталих екосистем: колективна монографія / за заг. ред. Т.О. Чайки. Полтава: Астроя, 2022. С. 279–322.

49. Properties of humic acid substances and their effect in soil quality and plant health / N. Vikram et al. *Humus and Humic Substances – Recent Advances*. 2022. DOI: 10.5772/intechopen.105803.

50. Чайка Т.О., Короткова І.В. Відновлення родючості ґрунту в Україні після воєнних дій. Захист і відновлення екологічної рівноваги та забезпечення

самовідновлення екосистем: колективна монографія / за заг. ред. Т. О. Чайки. Полтава: Астроя, 2023. С. 232–281.

51. Пістрюга Т. Розмінувати поля: час, гроші, ризики та чорний ринок саперів. 2022. URL: <https://latifundist.com/interview/626-rozminuvati-polya-chas-groshi-riziki-ta-chornij-rinok-saperiv>.

52. Про затвердження Методики визначення розміру шкоди завданої землі, ґрунтам внаслідок надзвичайних ситуацій та/або збройної агресії та бойових дій під час дії воєнного стану: наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України № 167 від 04.04.2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0406-22#Text>.

53. Васильєва Д., Даців С. Як держава фіксуватиме шкоду, завдану землям та ґрунтам внаслідок війни. 2022. URL: <https://yur-gazeta.com/publications/practice/zemelne-agrarne-pravo/yak-derzhava-fiksuvatime-shkodu--zavdanu-zemlyam-ta-gruntam-vnaslidok-viyni.html>.

## REFERENCES

1. Maizhe tretyna ukrainskykh poliv mozhe buty nezasiianymy abo nedostupnymy [Almost a third of Ukrainian fields may be unseeded or inaccessible]. 2022. Available at: <https://uncg.org.ua/a-third-ua-crops>.

2. Warren, S.D. (2001). Synopsis: Influence of biological soil crusts on arid land hydrology and soil stability. J. Belnap, O.L. Lange (eds.). *Biological soil crusts: Structure, function and management*. Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 351–362.

3. Ayers, P.D., Shaw, R.B., Diersing, V.E., Riper, J.Van. (1990). Soil compaction from military vehicles. Presentation at the International Summer Meeting. Michigan-St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers.

4. Demarais, S., Tazik, D.J., Guertin, P.J., Jorgensen, E.E. (1999). Disturbance associated with military exercises. L.R. Walker (ed.). *Ecosystems of disturbed grounds*. New York, Elsevier, pp. 385–396.

5. Warren, S.D., Eldridge, D.J. (2001). Biological soil crusts and livestock in arid ecosystems: Are they compatible? J. Belnap, O.L. Lange (eds.). *Biological soil crusts: Structure, function and management*. Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 403–417.

6. Belnap, J., Eldridge, D.J. (2001). Disturbance and recovery of biological soil crusts. J. Belnap, O.L. Lange (eds.). *Biological soil crusts: Structure, function and management*. Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 365–386.

7. Kade, A.N., Warren, S.D. (2002). Soil and plant recovery after historic military disturbances in the Sonoran desert, USA. *Arid Land Research and Management*. Vol. 16(3), pp. 231–243. DOI: 10.1080/153249802760284784.

8. Holubtsov, O., Sorokina, L., Splodytel, A., Chumachenko, S. (2023). Vplyv viiny rosii proty Ukrainy na stan ukrainskykh gruntiv. Rezultaty analizu [The influence of Russia's war against Ukraine on the state of Ukrainian justifications. Analysis results]. Kyiv, NGO Center for Environmental Initiatives "Ekodia", 32 p.

9. Kiernan, K. (2020). Geodiversity also needs protection during armed conflicts. Available at: <https://ceobs.org/geodiversity-also-needs-protection-during-armed-conflicts>.
10. Gorecki, S., Nessler, F., Hube, D., Mullot, J., Vasseur, P., Marchioni, E., Camel, V., Noel, L., LeBizec, B., Guerin, T., Feidt, C., Archer, X., Mahe, A., Riviere, G. (2017). Human health risks related to the consumption of foodstuffs of plant and animal origin produced on a site polluted by chemical munitions of the First World War. *Science of the Total Environment*. Vol. 599–600, pp. 314–323. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.213.
11. Stadler, T., Temesi, A., Lakner, Z. (2022). Soil Chemical Pollution and Military Actions: A Bibliometric Analysis. *Sustainability*. Vol. 14, 7138 p. DOI: 10.3390/su14127138.
12. Althoff, P.S., Thien, S.J. (2005). Impact of M1A1 main battle tank disturbance on soil quality, invertebrates, and vegetation characteristics. *Journal of Terramechanics*. Vol. 42, pp. 159–176. DOI: 10.1016/j.jterra.2004.10.014.
13. Certini, G., Scalenghe, R., Woods, W.I. (2013). The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*. Vol. 127, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.08.009.
14. Nawaz, M.F., Bourrié, G., Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. Vol. 33, pp. 291–309. DOI: 10.1007/s13593-011-0071-8.
15. Reabilitatsiia ukrainskykh gruntiv pislia viiny koshtuvatyme sotni milioniv dolariv – eksperty [Rehabilitation of Ukrainian soils after the war will cost hundreds of millions of dollars – experts]. 2022. Available at: <https://superagronom.com/news/16200-reabilitatsiya-ukrayinskih-gruntiv-pislya-viyni-koshtuvatime-sotni-milyoniv-dolariv--eksperti>.
16. Voienni dii na skhodi Ukrainy – tsyvilizatsiini vyklyky liudstvu [Military operations in eastern Ukraine – civilizational challenges to humanity]. Lviv, EPL, 2015, 136 p.
17. Tomic, N.T., Smiljanic, S., Jovic, M., Gligoric, M., Povrenovic, D., Dosic, A. (2018). Examining the effects of the destroying ammunition, mines, and explosive devices on the presence of heavy metals in soil of open detonation pit: Part 1 – Pseudo-total concentration. *Water, Air, & Soil Pollution*. Vol. 229, 301 p. DOI: 10.1007/s11270-018-3957-0.
18. Fayiga, A.O. (2019). Remediation of inorganic and organic contaminants in military ranges. *Environmental Chemistry*. Vol. 16, pp. 81–91. DOI: 10.1071/EN18196.
19. Voytsikhovska, A. (2015). Doslidzhennia EPL vplyvu viiskovykh dii na dovkillia na skhodi Ukrainy [ELH study of the impact of military operations on the environment in eastern Ukraine]. *Ekolohiia. Pravo. Liudyna* [Ecology. Law. Human]. no. 23–24 (63–64), pp. 57–59.
20. Zasyпка, L.H., Tarasenko, L.O., Makarikhina, I.V., Nikov, P.S., Liubchak, M.P., Stepanova, L.V., Babiienko, V.V. (2011). Sposib upravlinnia mihratsiieiu bioelementiv u systemi «grunt – kormy – orhanizm kurei-nesuchok – liudyna»: pat. 56958 Ukraina [The method of managing the migration of bioelements in the system "soil – feed – organism of laying hens – man": pat. 56958 Ukraine]. no. 2.
21. Soldatkin, O.O., Dziadevych, S.V., Soldatkin, O.P., Yelska, H.V. (2007). Konduktometrychni biosensor dlia vyznachennia kontsentratsii ioniv vazhkykh metaliv u vodnykh rozchynakh: pat. 25456 Ukraina [Conductometric biosensor for determining the concentration of heavy metal ions in aqueous solutions: pat. 25456 Ukraine]. no. 12.
22. Abramov, S.M., Sopelnyk, V.I. (2007). Ahroekolohichni preparat «biokolchuha»: pat. 26085 Ukraina [Agroecological preparation "bio mail": pat. 26085 Ukraine]. no. 14.
23. Makanjuola, O.M., Bada, B.S., Ogunbanjo, O.O., Olujimi, O.O., Akinloye, O.A., Adeyemi, M.O. (2019). Heavy metal speciation and health risk assessment of soil and jute mallow (*Corchorus Olitorus*) collected from a farm settlement in Ikorodu, Lagos, Nigeria. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*. no. 8(4), pp. 201–223. DOI: 10.4236/jacen.2019.84016.
24. Hevko, R.B., Dolzhenchuk, V.I., Broshchak, I.S., Dziadykevych, Yu.V., Hevko, B.R. (2016). Sposib ochyshchennia gruntiv vid radionuklidiv, vazhkykh metaliv i pestytsydiv: pat. 112025 Ukraina [A method of soil purification from radionuclides, heavy metals and pesticides: pat. 112025 Ukraine]. no. 22.
25. Samokhvalova, V.L. (2014). Biologichni metody remediacii' g'gruntiv, zabrudnykh vazhkymy metalamy [Biological methods of remediation of soils contaminated with heavy metals]. *Biologichni studii* [Biological studies]. no. 8(1), pp. 217–236. DOI: 10.30970/sbi.0801.337.
26. Sessitsch, A., Kuffner, M., Kidd, P., Vangronsveld, J., Wenzel, W.W., Fallmann, K., Puschenreiter, M. (2013). The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils. *Soil Biology & Biochemistry*. no. 60, pp. 182–194. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.01.012.
27. Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., Thewys, T., Vassilev, A., Meers, E., Nehnevajova, E., van der Lelie, D., Mench, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research*. no. 16, pp. 765–794. DOI: 10.1007/s11356-009-0213-6.
28. Havryliak, M.Ya., Baranov, V.I. (2010). Sposib ochyshchennia gruntiv porodnoho vidvalu vuhilnykh shakht vid vazhkykh metaliv: pat. 50789 Ukraina [The method of cleaning the soils of rock dumps of coal mines from heavy metals: pat. 50789 Ukraine]. no. 12.
29. Korzh, O.P., Savchenko, I.H., Hura, N.O. (2013). Fitoremediatsiyni sposib ochyshchennia gruntiv vid vazhkykh metaliv: pat. 76416 Ukraina [Phytoremediation method of soil purification from heavy metals: pat. 76416 Ukraine]. no. 1.
30. Dron, M.M., Chmylenko, F.O., Smitiuk, N.M. (2005). Sposib ochyshchennia tekhnohenko zabrudnykh gruntiv vid vazhkykh metaliv: pat. 4726 Ukraina [A method of cleaning technogenically polluted soils from heavy metals: pat. 4726 Ukraine]. no. 2.

31. Butiuhin, O.V., Uzdennikov, M.B., Hnedenko, M.V. (2009). Sposib rekultyvatsii terykoniv: pat. 45299 Ukraina [The method of reclamation of tericons: pat. 76416 Ukraine]. no. 21.
32. Makneil, S., Chamberlein, D., Bouver, R. (2010). Stres-tolerantna transhenna roslyna pshenytsi: pat. 90279 Ukraina [Stress-tolerant transgenic wheat plant: pat. 90279 Ukraine]. no. 8.
33. Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., Richer-Lafleche, M. (2008). Metal-contaminated soils: remediation practices and treatment technologies. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. no. 12(3), pp. 188–209. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-025X(2008)12:3(188).
34. Abramov, S.M., Sopelnyk, V.I. (2007). Sposib vyroshchuvannya silskohospodarskykh kultur na gruntakh, zabrudnennykh radionuklidamy i/abo vazhkymy metalamy: pat. 25274 Ukraina [The method of growing crops on soils contaminated with radionuclides and/or heavy metals: pat. 25274 Ukraine]. no. 12.
35. Abramov, S.M., Sopelnyk, V.I., Sopelnyk, K.V. (2008). Orhanomineralne pastopodibne dobrovyo: pat. 34132 Ukraina [Organomineral pasty fertilizer: pat. 25274 Ukraine]. no. 14.
36. Butiuhin, O.V., Uzdennikov, M.B., Zubkova, Yu.M., Hnedenko, M.V. (2008). Sposib rekultyvatsii terykoniv: pat. 38149 Ukraina [The method of reclamation of tericons: pat. 25274 Ukraine]. no. 24.
37. Karpenko, O.V., Shchekhlova, N.S., Vildanova-Martysyshyn, R.I., Baranov, V.I., Shulha, O.M. (2013). Preparat kompleksnoi dii dlia vykorystannia u silskomu hospodarstvi ta rekultyvatsii tekhnohennozminenykh gruntiv: pat. 77228 Ukraina [A drug of complex action for use in agriculture and reclamation of man-made soils: pat. 25274 Ukraine]. no. 3.
38. Murunga, S.I., Wafula, E.N., Sang, J. (2020). The Use of Freshwater Sapropel in Agricultural Production: A New Frontier in Kenya. *Advances in Agriculture*. 2020. 8895667. DOI: 10.1155/2020/8895667.
39. Allohverdi, T., Mohanty, A.K., Roy, P., Misra, M. (2021). A review on current status of biochar uses in agriculture. *Molecules*. Vol. 26(18), 5584 p. DOI: 10.3390/molecules26185584.
40. Karthik, A., Hussainy, S.A.H., Rajasekar, M. (2020). Comprehensive study on biochar and its effect on soil properties: a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. Vol. 9(05), pp. 459–477. DOI: 10.20546/ijemas.2020.905.052.
41. Keske, C., Godfrey, T., Hoag, D.L., Abedin, J. (2019). Economic feasibility of biochar and agriculture coproduction from Canadian black spruce forest. *Food and Energy Security*. Vol. 00, e118. DOI: 10.1002/fes3.188.
42. Dragišić, M. J., Zang, J., Zeng, F.H., Živanović, B.D., Shabala, L., Zhou, M., Shabala, S. (2013). Linking oxidative and salinity stress tolerance in barley: can root antioxidant enzyme activity be used as a measure of stress tolerance. *Plant and Soil*. Vol. 365(1–2), pp. 141–155.
43. Lopes, C., Herva, M., Franco-Uria, A., Roca, E. (2011). Inventory of heavy metal content in organic waste applied as fertilizer in agriculture: evaluating the risk of transfer into the food chain. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 18(6), pp. 918–939. DOI: 10.1007/s11356-011-0444-1.
44. Juwarkar, A., Nair, A., Dubey, K., Singh, S., Devotta, S. (2007). Biosurfactant technology for remediation of cadmium and lead contaminated soils. *Chemosphere*. Vol. 68, pp. 1996–2002. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.02.027.
45. Husarova, A. (2022). Microbial products can reduce the effect of heavy metals on plants in case of soil contamination [Microbial products can reduce the impact of heavy metals on plants in case of soil contamination]. Available at: <https://superagronom.com/news/16438-mikrobnii-produkti-mojut-zniziti-vplyv-vajkih-metaliv-na-roslini-u-razi-zabrudnennya-gruntiv>.
46. Rashad, M., Hafez, M., Popov, A.I. (2022). Humic substances composition and properties as an environmentally sustainable system: A review and way forward to soil conservation. *Journal of Plant Nutrition*. Vol. 45(7), pp. 1072–1122. DOI: 10.1080/01904167.2021.2005801.
47. Bhatt, P., Singh, V.K. (2022). Effect of humic acid on soil properties and crop production – A review. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. Vol. 92(12), pp. 1423–1430. DOI: 10.56093/ijas.v92i12.124948.
48. Korotkova, I.V., Chaika, T.O. (2022). Rol huminovykh preparativ ta yikh sumishei z mineralnymi dobrovyamy v tekhnolohiiakh vyroshchuvannya pshenytsi ozymoi [The role of humic preparations and their mixtures with mineral fertilizers in winter wheat growing technologies]. *Ekolohoorientovani pidkhody vidnovlennia tekhnohennozabrudnennykh terytorii i stvorennia stalykh ekosystem [Ecologically oriented approaches to the restoration of technologically polluted territories and the creation of sustainable ecosystems]*. Poltava, Astraya, pp. 279–322.
49. Vikram, N., Sagar, A., Gangwar, C., Husain, R., Narayan Kewat, R. (2022). Properties of humic acid substances and their effect in soil quality and plant health. *Humus and Humic Substances – Recent Advances*. DOI: 10.5772/intechopen.105803.
50. Chaika, T.O., Korotkova, I.V. (2023). Vidnovlennia rodiuchosti gruntu v Ukraini pislia voiennykh dii [Restoration of soil fertility in Ukraine after military operations]. *Zakhyst i vidnovlennia ekolohichnoi rivnovahy ta zabezpechennia samovidnovlennia ekosystem [Protection and restoration of ecological balance and ensuring self-renewal of ecosystems]*. Poltava, Astraya, pp. 232–281.
51. Pistryuga, T. (2022). Rozminuvaty polia: chas, hroshi, ryzyky ta chornyi rynek sapperiv [Demining the fields: time, money, risks and the black market of sappers]. Available at: <https://latifundist.com/interview/626-rozminuvati-polya-chas-groshi-riziki-ta-chornij-rinok-sapperiv>.
52. Pro zatverdzhennia metodyky vyznachennia rozmiru shkody zavdanoi zemli, gruntam vnaslidok nadzvychainykh sytuatsii ta/abo zbroinoi ahresii ta bioivnykh dii pid chas dii voiennoho stanu: nakaz Ministerstva zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy [On the approval of the methodology for determining the amount of damage caused to land and soil as a re-

sult of emergency situations and/or armed aggression and hostilities during martial law: order of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine]. 2022, no. 167. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0406-22#Text>.

53. Vasylieva, D., Datsiv, S. (2022). Yak derzhava fiksuvatyme shkod, zavdanu zemliam ta gruntam vnaslidok viiny [How the state will record the damage caused to lands and soils as a result of the war]. Available at: <https://yur-gazeta.com/publications/practice/zemelne-agrarne-pravo/yak-derzhava-fiksuvatime-shkod--zavdanu-zemlyam-ta-runtam-vnaslidok-viyni.html>.

### Directions and reproduction soil fertility technologies in the post-war period in Ukraine

Chaika T., Korotkova I.

The article is devoted to the study of the military action's negative consequences on the soil fertility state in Ukraine and directions for their reproduction. The topic actuality is that a third of the arable agricultural lands were affected by military actions, which, taking into account the agrarian direction of production in the eastern and southern regions of Ukraine, threatens a significant decrease in the agricultural products' cultivation.

The article aims to substantiate the effectiveness of technologies applied to overcome the affect of military activities on soil fertility reproduction in Ukraine.

The study reveals the war negative consequences on the soil structure and properties and argues that it will take hundreds of years to reproduce naturally. The main types of warfare-induced disturbances to soil are

defined and described: the soil structure modification (bombs craters, sealing, etc.) and chemical disturbances (pollutants input).

Taking into account the existing experience of overcoming the military actions consequences in the agricultural soil reproduction, a certain procedure for reproducing the soil fertility with different degrees and causes of damage is proposed. The options for soil reproduction with a natural integrity of genetic horizons violation and methods of removing contamination with heavy metals (mechanical, physico-chemical, and biological) are considered.

For the practical implementation of the proposed measures, an approximate costs' calculation of the soil fertility reproducing from the military actions consequences in Ukraine was made. It has been determined that for the reproduction of soil properties and their suitability for use in agricultural production, the greatest expenses (excluding humanitarian demining) are spent on mechanical melioration (81.8 %). However, the expenses amount depends on the number of shell explosion craters and their caliber, and the methods of reproduction the soil agrochemical properties.

The peculiarities of legal regulation in soil conservation and the fertility protection, in determination of damage caused to lands and soils of Ukraine as a result of armed aggression against the country are indicated. The performed calculations will become key evidence in terms of damage amount compensation in lawsuits against the aggressor country.

**Key words:** toxic elements, bombturbation, demining, basalt tuff, bioremediation, phytoremediation.



Copyright: Чайка Т.О., Короткова І.В. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



ORCID iD:

Чайка Т.О.

Короткова І.В.

<https://orcid.org/0000-0002-5980-7517>

<https://orcid.org/0000-0003-0577-9634>