

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Медичний факультет
Кафедра хімії та фармації

**СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ
НАФТОПРОДУКТАМИ ТА ПРОДУКТАМИ ЗГОРЯННЯ
ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ПІД ЧАС ВІЙНИ В УКРАЇНІ**

Кваліфікаційна робота
на здобуття ступеня вищої освіти “бакалавр”

Виконала: здобувачка 4 курсу, 06-442 гр.

Спеціальності 102 Хімія

Освітньо-професійної програми Хімія

Рошка Вікторія Валеріївна

Керівник: Попович Т.А.,

кандидатка технічних наук, доцентка

Рецензент: Семенченко О.О.,

кандидатка технічних наук, доцентка

кафедри хімічних технологій,

експертизи та безпеки харчових продуктів

Херсонського національного технічного

університету

Івано-Франківськ - Херсон,

2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ: ДЖЕРЕЛА, ПРОЦЕСИ ТА НАСЛІДКИ	5
1.1 Джерела надходження нафтопродуктів у ґрунт під час війни.....	5
1.2. Продукти згоряння вибухових речовин: природа та токсичність.	7
1.3. Міграція та трансформація органічних забруднювачів у ґрунті ...	9
1.4. Екологічні наслідки та ризики для довкілля й здоров'я населення	11
РОЗДІЛ 2. НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ҐРУНТІВ ВІД НАФТОПРОДУКТІВ ТА ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ	14
2.1. Біоремедіація: мікробіологічні процеси, штами-деструктори, умови ефективності	14
2.2. Фіторемедіація: механізми, рослини-гіперакумулятори, переваги й обмеження	18
2.3. Сорбційні технології: природні та модифіковані сорбенти	21
2.4. Хімічні методи (процес Фентона, пероксиди, озонування)	23
2.5. Термодеструкція та інші фізико-хімічні методи	30
2.6. Комбіновані технології: синергічні системи очищення	33
РОЗДІЛ 3. МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В УКРАЇНІ.....	36
3.1. Очищення ґрунтів у зонах воєнних конфліктів: досвід Балкан, Іраку, Кувейту	36
3.2. Рекомендації UNEP, ЕРА щодо ремедіації забруднених територій	39
3.3. Потенційні можливості впровадження технологій в Україні	41
3.4. Перспективи застосування методів очищення ґрунтів	44
ВИСНОВКИ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	51

ВСТУП

Актуальність теми. Внаслідок повномасштабних військових дій на території України значно зросли масштаби техногенного забруднення довкілля, зокрема ґрунтового покриву. Руйнування нафтобаз, обстріли військової техніки, пожежі, застосування вибухових речовин та бойових боєприпасів призводять до інтенсивного потрапляння в ґрунт нафтопродуктів, продуктів їх неповного згоряння, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, залишків вибухових речовин та інших токсичних органічних сполук. Ці речовини мають високу стійкість, тривалий період розкладу та значну екотоксичність, що створює загрозу для родючості ґрунтів, якості підземних вод, стану екосистем та здоров'я населення.

У контексті післявоєнного відновлення територій України постає вкрай актуальне завдання розроблення та впровадження ефективних, екологічно безпечних і технологічно обґрунтованих методів очищення ґрунтів. Науковий інтерес зосереджується на сучасних технологіях – біоремедіації, фіторемедіації, сорбційних і хімічно-оксидативних методах, застосуванні наноматеріалів та комбінованих підходів. Огляд цих технологій є важливим для формування стратегії екологічної безпеки та відновлення територій, постраждалих від бойових дій.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена різким зростанням забруднення ґрунтів унаслідок військових дій в Україні та нагальною потребою розроблення й впровадження ефективних екологічно безпечних технологій їх очищення для забезпечення відновлення довкілля і захисту здоров'я населення.

Мета дослідження. Визначити ефективність, екологічні переваги та перспективи застосування сучасних технологій очищення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами й продуктами згоряння вибухових речовин унаслідок військових дій в Україні.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати джерела та типи забруднення ґрунтів нафтопродуктами і продуктами згоряння вибухових речовин під час війни, а також визначити їхні фізико-хімічні властивості та вплив на ґрунтові екосистеми.
2. Охарактеризувати сучасні технології очищення ґрунтів (біоремедіацію, фіторемедіацію, сорбційні та хімічно-оксидативні методи, комбіновані підходи) та оцінити їхні переваги, недоліки й межі застосування.
3. Узагальнити міжнародний досвід ремедіації територій, забруднених під час воєнних конфліктів.
4. Обґрунтувати перспективи впровадження сучасних методів очищення ґрунтів в Україні в умовах післявоєнного відновлення.

Об'єкт дослідження: хімічне забруднення ґрунтів.

Предмет дослідження: сучасні технології очищення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами та продуктами згоряння вибухових речовин під час війни в Україні.

Методи дослідження: аналіз та систематизація наукової літератури; порівняльний аналіз технологій очищення; огляд міжнародних екологічних стандартів (UNEP, EPA, EEA); метод експертної оцінки та узагальнення даних; аналітичний опис екологічних наслідків забруднення.

Апробація результатів дослідження. Опубліковано наукову тезу «Modern technologies for the restoration of soils contaminated with petroleum products and chemical components of explosive substances» в електронній збірці матеріалів III міжнародна науково-практична конференція “Синергія науки і бізнесу” (квітень 22- 24 2026)

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступної частини, трьох розділів з підрозділами, загальних висновків, списку використаних джерел (60 найменувань). Робота містить 6 таблиць, 10 рисунків. Загальний обсяг роботи складає 59 сторінок.

РОЗДІЛ 1

ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ: ДЖЕРЕЛА, ПРОЦЕСИ ТА НАСЛІДКИ

1.1. Джерела надходження нафтопродуктів у ґрунт під час війни

Військові дії в Україні є одним із найголовнішим чинником забруднення навколишнього середовища. Руйнування інфраструктури, детонація вибухових речовин, вилив нафтопродуктів, пожежі, знищення військової та цивільної технік призводять до забруднення повітря, води, а особливо ґрунтів. Адже ґрунти є основною базою для вирощування продуктів харчування, і вкрай важливо не допустити забруднення землі нафтопродуктами. Нафтопродукти становлять загрозу для ґрунтів, оскільки негативно впливають на їх фізико-хімічні властивості. Вони утворюють гідрофобну плівку, яка ускладнює водо- і газообмін, та пригнічують активність мікроорганізмів. У результаті це призводить до зниження родючості ґрунту та зменшення його екологічної стійкості [1].

Нафтопродукти є хімічно стійкими, токсичними і здатні до накопичення в ґрунтових покривах не одне десятиліття. Дані речовини потрапляють у поверхню різними шляхами (рис 1.1):

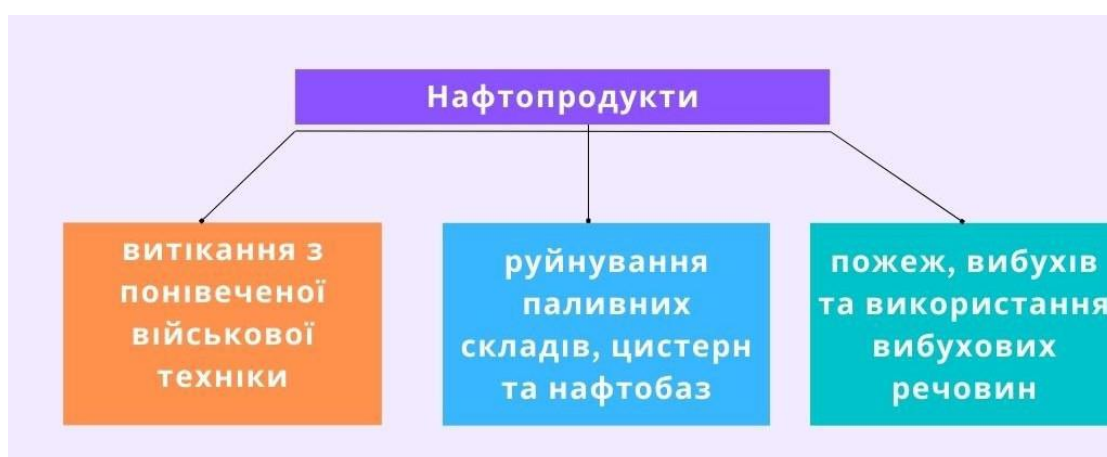


Рис.1.1. Надходження нафтопродуктів в ґрунтові покриви

У разі насичення ґрунту нафтою спостерігається руйнування його структури, зниження водопроникності, витіснення кисню, а також суттєві зміни у мікробіологічних та біохімічних процесах. Погіршується співвідношення між Карбоном і Нітрогеном, зменшується кількість доступних форм Фосфору та Калію. Також відбувається засолення ґрунтів, що призводить до змін в поглинаючому комплексі, де йони Натрію витісняють йони Кальцію та Магнію, які наявні в чистій поверхні землі. Через наявну нафтову плівку зменшується обмін ґрунтових колоїдів, через що виникає осолонцювання ґрунтів. Це негативно впливає на водний, повітряний і поживний баланс у ґрунті, ускладнює живлення кореневої системи рослин, уповільнює їхній ріст і розвиток, що в кінцевому результаті може спричинити загибель рослин. Дослідження, проведені дослідниками [1,2] засвідчили, що за забруднення ґрунту нафтою на рівні понад 2% від його загальної маси, відбуваються незворотні зміни, які порушують взаємодію в системі ґрунт – рослина [1, 2].

Крім того, разом з нафтою у чорноземі потрапляють важкі метали і металоорганічні комплекси, які можуть містити уран, що може призвести до радіаційного забруднення, роблячи поверхню землі непридатною для сільськогосподарських цілей [2].

Нафтопродукти, що потрапляють у ґрунт внаслідок військових дій, можуть переносити продукти горіння та детонації вибухових матеріалів, такі як поліциклічні ароматичні вуглеводні, нітросполуки та інші токсичні органічні речовини. Це робить нафту і її похідні ефективними переносниками вторинних забруднювачів, сприяючи їх переміщенню у ґрунтовому профілі та підсилюючи комбіновану токсичну дію. У зв'язку з цим виникає потреба в детальному дослідженні природи й токсичних характеристик продуктів горіння вибухових речовин.

1.2. Продукти згоряння вибухових речовин: природа та токсичність

Вибухові речовини, які використовуються під час військових дій, є одним із видом надходження складних хімічних забруднювачів, які утворюються внаслідок детонації, неповного згорання боєприпасів. Продукти згоряння вибухових речовин є одні з найнебезпечніших забруднювачів ґрунтів, оскільки є токсичними, стійкими у середовищі, здатні до міграції та накопичення в землі [3].

До основних вибухонебезпечних речовин відносять тротил (2,4,6-тринітротолуен), гексоген (1,3,5-тринітро-1,3,5-триазин) та октоген (октагідро-1,3,5,7-тетранітро-1,3,5,7-тетразоцин) та їх суміші (рис. 1.2).

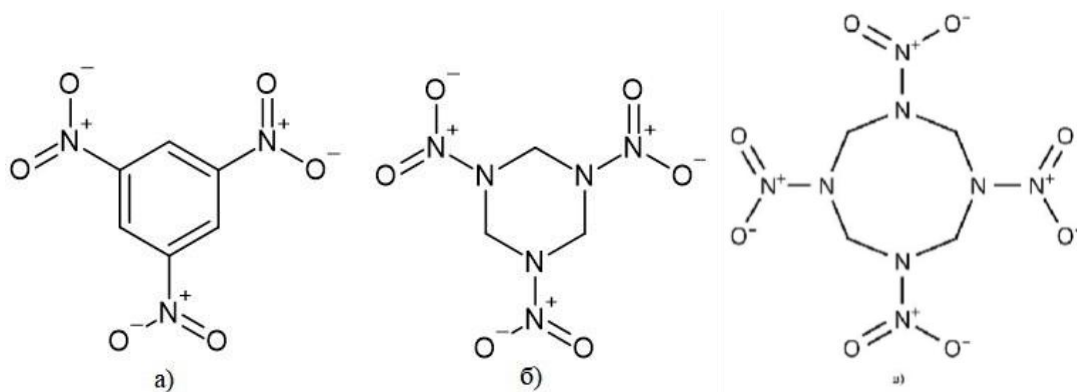


Рис. 1.2. Вибухові речовини: а) тротил, б) гексоген, в) октоген.

Під час детонації, дані сполуки зазнають фізико-хімічних змін, у результаті чого утворюються продукти повного і неповного згорання. Частина суміші, в яких присутні тротил, гексоген, октоген та інші сполуки не повністю згорають і осаджуються на поверхню ґрунту або ж потрапляють в землю з частинами не розірваних боєприпасів і з продуктами горіння [4].

Хімічна природа продуктів згорання характеризується високою різноманітністю та складністю складу, що зумовлено утворенням численних органічних і неорганічних сполук у процесі повного і неповного згорання. До складу входять нітросполуки, альдегіди, кетони, смоли, сажа, оксиди Нітрогену та Карбону. Особливо небезпечними є ароматичні

нітрогеновмісні сполуки, оскільки є продуктами неповного згорання тротилу та характеризуються високою токсичністю та мутагенною активністю [5].

При цьому поведінка продуктів згорання у ґрунті визначається їх фізико-хімічними властивостями, типом ґрунту, вмістом органічних сполук та води, кислотністю та мікробіологічною активністю. Нітроароматичні сполуки зазвичай концентруються у гумусі, де відбувається їх інтенсивна сорбція гумусовими кислотами та мінеральними колоїдами. У той же час в умовах підвищеної вологості або поверхневих механічних порушень ґрунту можливе їхнє переміщення в глибші шари, або потрапляння у ґрунтові води [6].

Токсичність продуктів згорання вибухових речовин проявляється в усіх формах живих організмів. Для бактерій, які є в поверхні землі характерне пригнічення ферментативної активності, зменшення мінералізованих процесів. Нітросполуки негативно впливають на кількість і склад ґрунтових бактерій та грибів, що призводить до деградації землі та зменшення родючості чорнозему.

До рослин токсичні продукти згорання потрапляють через кореневу систему. Наслідки проявляються у пригніченні росту, порушення фотосинтезу, зменшення біомаси та накопичення в рослинах токсичних сполук. Небезпечним є потрапляння ароматичних нітросполук у сільськогосподарські культури, оскільки є ризик потрапляння даних речовин у харчові ланцюги.

Особливою небезпекою включається комбінований токсичний ефект, що виникає під час одночасного забруднення ґрунту нафтопродуктами, продуктами згорання вибухових речовин та важкими металами. Таке багатокомпонентне забруднення поширене у зоні діючих бойових дій та суттєво ускладнює екологічну експертизу ґрунтів та вибір методів ремедіації. Підсилення токсичності окремих компонентів забруднення призводить до більш глибоких та тривалих екологічних наслідків. Тому

дуже важливо знати як мігрують та трансформуються органічні забруднювачі у ґрунті.

1.3. Міграція та трансформація органічних забруднювачів у ґрунті

Міграція органічних забруднювачів у ґрунті є процесом переміщення хімічних речовин під впливом фізичних, хімічних та біологічних факторів. Міграція залежить від властивостей забруднювачів та особливості ґрунту [3].

Вертикальна міграція переважно відбувається разом із інфільтраційними водами. Органічні сполуки, які добре розчиняються у воді або слабо зв'язуються з ґрунтовими частинками можуть проникати у більш глибокі шари ґрунту, досягаючи підземних вод і спричиняти їх забруднення. Найчастіше таке переміщення спостерігається в легких піщаних ґрунтах із низьким вмістом органічних речовин та високою водопроникністю [1].

Горизонтальна міграція відбувається разом із поверхневим стоком, особливо під час сильних дощів чи танення снігу. У цьому випадку забруднювачі можуть переноситись на значні відстані разом із частинками землі, які піддаються ерозії, і потрапляють у водойми, річки та інші водні системи [1].

При масовій нафтовій міграції актуалізується особлива екологічна небезпека від їх проникнення у ґрунт у зоні бойових дій. Нафтопродукти являють собою складну суміш вуглеводнів різної молекулярної маси, тому їх міграційна поведінка різноманітна. Легкі фракції, зокрема бензини та керосини, відносно швидко пересуваються по ґрунтовому профілю разом із інфільтратом, а важкі фракції, наприклад мазути та оливи, переважно накопичуються у верхніх гумусово-продуктивних горизонтах, де створюють зони тривалого забруднення. У міграції важливу роль відіграють дифузії та дисперсійні явища сорбції, пов'язані з гумусовими речовинами та

глинистими мінералами. Висока кількість гумусу в ґрунті знижує рухливість вуглеводнів, але одночасно ускладнює процес природного самоочищення ґрунту [3].

Трансформація органічних забруднювачів у ґрунті охоплює низку процесів, що змінюють хімічну структуру, фізичні характеристики й токсичність. Дані зміни можуть спричинити як нейтралізацію забруднювачів, так і утворення більш стійких або небезпечних продуктів розпаду.

Біологічна трансформація здійснюється за участі ґрунтових мікроорганізмів. У процесі метаболізму мікроорганізми використовують органічні забруднювачі як джерело енергії та перетворюють дані сполуки у вуглекислий газ, воду та мінеральні солі. Дане перетворювання залежить від багатьох чинників, а саме від температури, вологи, аерації ґрунту та хімічної будови забруднювачів [1].

Хімічна трансформація включає реакції, що протікають в самому ґрунтовому середовищі. Серед реакцій – окиснення та відновлення, які впливають на ступінь окиснення молекул; гідроліз, який характерний для пестицидів і органічних сполук; фотохімічні реакції, які відбуваються у верхніх шарах землі під дією сонячного світла. Швидкість цих процесів залежать від рН ґрунту, вологи та наявності каталізаторів.

На трансформацію можуть впливати продукти згорання вибухових речовин, які виникають внаслідок згорання та детонації під час військових дій. Дані сполуки характеризуються високою токсичністю, мутагенними та канцерогенними властивостями, здатністю до тривалої персистенції у землі. Важливою особливістю є те, що нафта та нафтопродукти можуть виступати ефективними переносниками продуктів згорання вибухових речовин. Органічні компоненти вибухових залишків адсорбуються на поверхні нафтових плівок, що призводить до дегредації родючих шарів ґрунту [1].

Фізична дегредація пов'язана зі змінами фізичного стану органічних забруднювачів без значного перетворення хімічної структури. До процесів

належать випаровування летких органічних сполук з поверхні ґрунту або розчинення в ґрунтових водах. Хоча дане явище сприяє зменшенню концентрації забруднювачів у землі, але це може призвести до переміщення в компоненти довкілля – атмосферу чи водні екосистеми [1].

Усі ці процеси разом визначають тривалість збереження органічних забруднювачів у ґрунті, рівень їхньої екологічної небезпеки та вплив на навколишнє середовище.

1.4. Екологічні наслідки та ризики для довкілля й здоров'я населення

Забруднення ґрунтів органічними токсикантами такими як нафтопродуктами та продуктами згорання вибухових речовин призводять до комплексних екологічних наслідків, що проявляються на всіх рівнях екосистеми та становлять серйозну загрозу для здоров'я населення [7].

Із першочергових наслідків є дегредація ґрунту, внаслідок накопичення забруднювачів, які порушують фізико-хімічні властивості землі, знижує аерацію, водопроникність та пригнічує активність мікробіоти. Це негативно впливає на процеси утворення гумусу, мінералізації органічних сполук та кругообіг необхідних мікро- та макроелементів, що призводить до зниження родючості ґрунту [8,9, 10].

Міграція та трансформація забруднювачів створює додаткову загрозу для підземних і поверхневих вод. Переміщення отруйних речовин разом з інфільтраційними водами може призвести до забруднення водних об'єктів, що небезпечно для регіонів з інтенсивним використанням підземних вод для споживання. Потрапляння токсичних сполук у водойми сприяє погіршенню якості води та накопичення забруднювачів, що призводить до додаткових процесів очищення води для споживання [11, 12].

Також негативний вплив органічних забруднювачів поширюється і на рослини. Отруйні сполуки поглинаються кореневою системою рослин, що може призвести до пригнічення росту, порушення фізіологічних процесів і втратою врожайності. Дані процеси можуть спричинити до накопичення токсикантів у біомасі, що створює умови для надходження в харчові ланцюги [13, 14].

Значну екологічну загрозу становить біоаккумуляція та біомагніфікація органічних токсикантів. Отруйні речовини, які надходять у землю, можуть передаватись від мікробіоти до рослин, від рослин – до тварин і людей, спричиняючи до накопичування у тканинах, що створює довготривалий ризик наявності токсикантів за відносно низьких концентрацій у навколишньому середовищі [12, 15].

Для здоров'я народу забруднення угідь отруйними речовинами підвищує ризик розвитку або загострень хронічних захворювань. Надходження нафтопродуктів та продуктів згоряння вибухових речовин в організм людини можливе через забруднену воду, продукти харчування або пил. Такі сполуки здатні чинити канцерогенну, мутагенну та ендокринно-руйнівну дію, що зумовлює підвищення ризику онкологічних, серцево-судинних та репродуктивних порушень (Рис 1.3) [7, 11,14].



Рис 1.3. Екологічні наслідки та ризики для довкілля та здоров'я населення [7,11,14].

Таким чином, дуже важливо вчасно досліджувати ґрунти на наявність токсичних сполук для мінімізації величезних наслідків, як для земельних угідь, рослинного та тваринного світів та людей. Важливо вчасно підібрати сучасні технології для очищення ґрунтів від нафтопродуктів та продуктів згоряння під час військових дій і використання даних технологій після закінчення війни на території України.

РОЗДІЛ 2

НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ҐРУНТІВ ВІД НАФТОПРОДУКТІВ ТА ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ

2.1. Біоремедіація: мікробіологічні процеси, штами-деструктори, умови ефективності

Традиційні фізико-хімічні методи очищення ґрунтів часто характеризуються високою вартістю, значними витратами та ризиком вторинного забруднення особливо коли земля забруднена нафтопродуктами та продуктами згорання вибухових речовин. У зв'язку з цим виникає розгляд нових методів очищення, серед яких біоремедіація (рис 2.1) [16].



Рис 2.1. Схема роботи біоремедіації в забруднених ґрунтах

Біоремедіація ґрунтується на здатності живих організмів трансформувати або повністю перетворювати органічні забруднювачі більш безпечні сполуки. Основну роль в процесах відіграють ґрунтові бактерії та гриби, які використовують органічні поліютанти як джерело енергії і залучають їх до метаболічних процесів [17].

Мікробіологічна біоремедіація відбувається через складні біохімічні процеси які включають ферментативне окиснення, гідроліз та спільний метаболізм органічних сполук. У природі ці процедури виконуються з

участю різних груп мікроорганізмів, які здатні до розщеплення аліфатичних ароматичних та поліциклічних вуглеводнів що входять до складу продуктів нафти та її спалювання [18].

Аеробна біоремедіація є найефективнішим способом перетворення більшості нафтопродуктів. У присутності кисню мікробні організми активують кисневі ферменти зокрема моно- і діоксигенази ці ферменти розщеплюють карбонові зв'язки що призводить до утворення менш токсичних проміжних речовин і подальшої мінералізації у вуглекислий газ та воду [19].

При анаеробній біоремедіації органічних забруднювачів відбувається значно повільніше і часто супроводжується накопиченням стійких проміжних речовин. Такі умови незвичні для заболочених або ущільнених ґрунтів де доступ кисню обмежений [20].

Головний механізм перетворення знаходиться в спільному метаболізмі, де мікроорганізми виконують розкладання небезпечних речовин разом з метаболізмом основного компоненту. Ця процедура має особливе значення для розкладання складних ароматичних і нітрогеновмісних сполук, які утворюються внаслідок горіння та вибуху небезпечних речовин (табл. 2.1) [21].

Таблиця 2.1

Мікроорганізми, які беруть участь в біоремедіації

Вид мікроорганізмів	Тип забруднювача	Процес очищення	Ефективність методу
Pseudomonas	Ароматичні вуглеводні та поліциклічні сполуки	Деструкція ароматичних структур, висока метаболічна гнучкість	Висока ефективність при аеробних умовах

Rhodococcus	Довголанцюгові алкани та гетероциклічні сполуки	Розкладання стійких алканів, стійкість до токсичних речовин	Висока метаболічна пластичність
Bacillus	Нафтопродукти та продукти горіння	Виживання та очищення в несприятливих умовах завдяки спорам	Висока стійкість до несприятливих умов
Acinetobacter	Нафтопродукти	Метаболічна деградація забруднювачів	Висока стійкість до високих концентрацій
Alcanivorax	Нафтопродукти	Спеціалізована деградація вуглеводнів нафти	Висока метаболічна гнучкість

Ефективність біоремедіації значно залежить від складу видів і активності мікроорганізмів. Найбільш поширені бактерії які пов'язані з руйнуванням нафтопродуктів є представники роду *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Alcanivorax* вони мають високу метаболічну пластичність і стійкість до токсичних речовин забруднювачів. Ці мікроорганізми вирізняються високою метаболічною гнучкістю та стійкістю до високих концентрацій забруднювачів [19].

Бактерії роду *Pseudomonas* ефективно руйнують ароматичні вуглеводні та поліциклічні сполуки, а представники роду *Rhodococcus* здатні деградувати довголанцюгові алкани та гетеротичні сполуки. Бактерії роду *Bacillus* додатково створюють спори, які в подальшому використовуються для виживання в несприятливих умовах ґрунту [17,18].

Мікроскопічні гриби відіграють ключову роль у біоремедіації, і утворюють ферменти, які можуть зруйнувати міцні, стабільні структури, що містяться в продуктах горіння. Додавання грибів для біоремедіації є перспективною тенденцією для очищення ґрунту складним багатоконтинентальним забрудненням [16].

Для підвищення ефективності очищення дедалі частіше використовують мікробні консорціуми, що поєднують декілька штамів із різними метаболічними можливостями. Такий підхід забезпечує більш повну деградацію складних сумішей органічних забруднювачів.

Ефективність біоремедіації землі залежить від фізичних та хімічних властивостей і життя в ґрунті. Один з головних чинників – це температура. Більшість мікробів працюють найкраще, коли температура від 20 до 35 градусів. Якщо стає холодніше, хімічні процеси й розпад речовин йдуть повільніше [19].

Волога допомагає мікроорганізмам зростати, дає їм поживні речовини, і кисень поширюється швидше. Якщо води у ґрунті забагато, виникають умови без кисню, і мікробіота працює гірше, а розпад шкідливих речовин уповільнюється [19].

Рівень pH, також впливає на ці процеси. Бактерії живуть і працюють краще, коли ґрунт не дуже кислий і не дуже лужний, а ближче до середнього рівня. Якщо pH дуже низький або високий, то мікрофлора майже не росте і не справляється із забрудненням [22].

Важливо також, щоб у землі були поживні речовини, зокрема Нітроген і Фосфор. Якщо ґрунт забруднений нафтою чи її продуктами, то часто там багато Карбону, але мало інших речовин, що потрібні для життя. Через це росту маленьких організмів стає меншим. Якщо додати добрива, як-от мінеральні або органічні, це може допомогти і прискорити очищення землі від шкідливих речовин [20].

Хоча біоремедіація добре працює для зниження органічних шкідливих речовин, її не завжди можна легко застосувати. Це часто залежить від того, які саме ґрунти і погодні умови є в певному місці, також від того, наскільки велика шкода для ґрунту, і чи можна добре спостерігати і керувати тим, як там працюють мікроби. Через ці причини зараз люди все більше цікавляться іншими чи додатковими шляхами очищення ґрунту. Один з таких шляхів – це фіторемедіація. Вона працює так: рослини можуть брати з ґрунту

шкідливі речовини, зберігати їх у собі або змінювати так, щоб вони стали менш шкідливими. Тому метод фіторемедіації допомагає зняти шкоду й очистити землю, особливо там, де біоремедіацію не можна легко застосувати.

2.2. Фіторемедіація: механізми, рослини-гіперакумулятори, переваги й обмеження

Фіторемедіація є одним із перспективних методів відновлення ґрунтів, який ґрунтується на використанні рослин для вилучення, накопичення, трансформації та стабілізації токсичних речовин у навколишньому середовищі. На відміну від фізико-хімічних методів очищення, фіторемедіацію відносять до екологічно безпечних технологій, оскільки базується на процеси, які відбуваються у рослині (табл. 2.2) [23].

Таблиця 2.2

Основні методи фіторемедіації забруднених ґрунтів та їх характеристика

Метод	Принцип дії	Забруднювачі	Переваги методу
Фітоекстракція	Поглинання забруднювачів кореневою системою та їх транспортування в пагін	Важкі метали та деякі органічні сполуки	Екологічна безпечність, економічна доцільність, відновлення деградованих територій, очищення значних площ без зняття шару ґрунту

Продовження таблиці 2.2

Фітодеструкція	Ферментативне	Складні	Перетворення
----------------	---------------	---------	--------------

	розщеплення токсичних речовин всередині клітин рослини	токсиканти (органічні сполуки)	токсикантів на менш небезпечні або інертні сполуки
Фітостабілізація	Обмеження міграції токсикантів через сорбцію та комплексоутворення на коренях або у прикореневій зоні	Токсичні речовини, що загрожують грунтовим водам та харчовим ланцюгам	Зменшення ризику надходження забруднювачів у довкілля, збереження природних ландшафтів

Механізми фіторемедіації є різноманітними та залежать від природи забруднювача, властивостей ґрунту та рослини. Найпоширенішим механізмом є фітоекстракція, яка полягає у поглинанні забруднювачів землі кореневою системою та транспортування в пагін. Даний механізм є ефективним щодо важких металів та деяких органічних сполук, які здатні накопичуватися в рослинах без значного порушення життєдіяльності [24].

Важливим механізмом є фітодекструкція, за якої токсичні речовини піддаються ферментативному розщепленню всередині клітин рослини. У даному процесі можуть бути задіяні оксидази, пероксидази, дегідрогенази, які забезпечують перетворення складних токсикантів на менш небезпечні або інертні сполуки [24].

Також значну роль відіграє фітостабілізація, яка спрямована не на вилучення токсикантів, а на обмежені їх міграції по ґрунту. Рослини здатні фіксувати токсичні речовини за рахунок сорбції, комплексоутворення, що зменшує кількість забруднювачів у ґрунтові води та ризик надходження у харчові ланцюги [25].

Ефективність фіторемедіації залежить від вибору рослини. Привертають увагу рослини-гіперакумулятори, які здатні накопичувати високі концентрації токсичних речовин. До таких рослин належать *Brassica juncea*, *Helianthus annuus*, *Salix* spp., *Populus* spp., які відзначаються швидким ростом, значною біомасою та стійкістю до забруднення. Їх використання

дозволяє очищати значні площі ґрунтів без необхідності зняття верхнього шару або застосування дорогих технічних методів [25].

Здатність рослин до гіперакумуляції значною мірою залежить від фізико-хімічних характеристик ґрунту, таких як рН, гранулометричний склад, наявність органічної речовини та вологості. У несприятливих умовах мобільність забруднювачів може знижуватися, що негативно впливає на ефективність процесу фітоекстракції. До того ж надмірна токсичність ґрунтів здатна пригнічувати рослини, що в результаті зменшує їхній потенціал для екологічного очищення [26].

Серед основних переваг фіторемедіації слід відзначити її екологічну безпечність, економічну доцільність і можливість відновлення деградованих територій без істотного порушення природних ландшафтів. Використання рослин сприяє поліпшенню структури ґрунту, активізації мікробіологічних процесів і підвищенню загальної екологічної стабільності територій. Особливо актуальним цей підхід є для великих площ із помірним рівнем забруднення, у тому числі на постконфліктних та аграрних землях [27].

Фіторемедіація, попри її ефективність, має певні обмеження, які необхідно враховувати під час практичного застосування. Однією з головних проблем є значна тривалість процесу, оскільки ріст рослин і накопичення забруднювачів потребують чималого часу. Крім того, глибина очищення визначається можливостями проникнення кореневих систем, через що забруднення у глибших шарах ґрунту залишаються практично недосяжними для ефективного видалення [12].

Ще одне важливе питання – утилізація рослинної біомаси після завершення процесу фітоекстракції. В рослинах накопичуються токсичні речовини, які потребують безпечної переробки або знешкодження. У разі недотримання цих заходів існує ризик повторного забруднення довкілля. У зв'язку з цим фіторемедіацію найдоцільніше використовувати як елемент інтегрованих систем очищення, комбінуючи її з іншими біологічними або інженерними методами [20].

Тоді, актуальним стає використання методів, які здатні оперативно знижувати концентрацію забруднювачів та обмежувати їх міграцію в ґрунтових умовах. Одним із ефективних підходів є сорбційні технології, що передбачають застосування природних або модифікованих сорбентів для зв'язування і утримання токсичних речовин у ґрунтах та водних середовищах.

2.3. Сорбційні технології: природні та модифіковані сорбенти

Сорбційні технології належать до найефективніших і найдоступніших способів зменшення забруднення ґрунтів нафтопродуктами та органічними токсичними сполуками, які виникають під час згоряння чи детонації вибухових речовин. Їхній механізм базується на властивості твердих матеріалів із розвиненою поверхнею поглинати й утримувати молекули забруднювачів шляхом фізичної адсорбції, хемосорбції та капілярних ефектів. Це сприяє обмеженню міграції токсичних сполук у ґрунті та зменшенню ймовірності вторинного забруднення водних екосистем (рис 2.2) [28].



Рис. 2.2. Види сорбентів та їх використання

Для сорбційних технологій використовують природні та модифіковані сорбенти. До природних сорбентів, які мають широкий попит для очищення

ґрунтів від нафтопродуктів відносять глинисті мінерали, цеоліти, вермикуліт, діатоміт, торф. Ці матеріали мають високу питому поверхню, пористість, наявність активних центрів, як здатні взаємодіяти з гідрофобними органічними забруднювачами. Моделювання Ханлі Саймон Бінгарі, Енді Гібсона та Річарда Тьюва показали, що природні сорбенти ефективно знижують вміст забруднювачів завдяки фізичному поглинанню та фіксації на своїй поверхні [29, 30].

Також використовують природні органо-мінеральні сорбенти, зокрема торф і матеріали на його основі, активно використовуються завдяки своїм унікальним властивостям. Високий вміст гумінових речовин у таких сорбентах забезпечує ефективне зв'язування нафтопродуктів і ароматичних органічних сполук, включаючи поліциклічні ароматичні вуглеводні, що входять до складу продуктів неповного згоряння вибухових речовин. Окрім цього, додавання торфовмісних сорбентів до ґрунту позитивно позначається на його фізико-хімічних характеристиках, покращуючи здатність утримувати вологу та сприяючи відновленню структури ґрунту [31].

Природні сорбенти, хоч і доступні та екологічно безпечні, часто мають обмежену ефективність при високих рівнях забруднення чи у випадках складних сумішей органічних токсикантів. Тому активно розробляються технології створення модифікованих сорбентів. Завдяки хімічній, термічній або фізико-хімічній обробці їх поверхневі характеристики змінюються, що значно підвищує здатність до сорбції та забезпечує більш високу селективність [32].

Модифікація глинистих і кремнеземних матеріалів сприяє збільшенню кількості активних функціональних груп і пор. Це суттєво покращує здатність таких сорбентів поглинати не тільки нафтопродукти, але й полярні органічні сполуки, які є характерними для продуктів згоряння вибухових речовин. Експериментальні дослідження підтверджують, що модифіковані сорбенти мають вищу нафтоємність і краще утримують забруднювачі в

умовах ґрунтового середовища у порівнянні з немодифікованими варіантами [33].

Використання як природних, так і модифікованих сорбентів у ґрунтах, забруднених нафтовими продуктами та залишками згоряння вибухових речовин, сприяє швидкому зниженню концентрації токсичних сполук та обмеженню їх поширення. Однак результативність сорбційних методів значною мірою залежить від гранулометричного складу ґрунту, ступеня його зволоження, рівня рН і характеру забруднення. Водночас необхідність утилізації чи регенерації використаних сорбентів залишається важливим аспектом екологічної безпеки таких підходів, що потребує додаткової уваги [28, 31].

Сорбційні технології, попри їх високу ефективність у поглинанні та ізоляції нафтопродуктів і продуктів згоряння вибухових речовин, не здатні забезпечити їх повного хімічного знешкодження. Для більш глибокого розкладання органічних забруднювачів і зменшення їхньої токсичності доцільно використовувати хімічно-окисативні методи, які базуються на застосуванні потужних окиснювачів і активних радикалів.

2.4. Хімічні методи (процес Фентона, пероксидні методи, озонування)

Хімічні методи відіграють ключову роль серед сучасних технологій ремедіації ґрунтів, забруднених органічними токсикантами, включно з нафтовими вуглеводнями та продуктами згоряння вибухових речовин. Ці забруднювачі мають складну хімічну структуру, високий рівень токсичності та стійкість до природних процесів самоочищення, що обумовлює необхідність застосування інтенсивних заходів для їх видалення. Основу хімічних підходів складає використання сильних окисників, здатних каталізувати розщеплення органічних сполук до менш токсичних або

мінералізованих форм. Серед найбільш поширених і детально досліджених методів виділяють процес Фентона, технології на базі пероксидів, а також озонування (табл 2.3) [34].

Таблиця 2.3

Основні хімічні методи ремедіації ґрунтів: реагенти, механізм дії та екологічні аспекти

Хімічні методи	Реагенти та механізм дії	Переваги	Вплив на довкілля
Процес Фентона та пероксидні методи	Гідроґен пероксид із додаванням речовин, які містять йони Fe(II), що діють як каталізатори, працює через механізм каталітичного розкладання. У процесі утворюються гідроксильні радикали, які сприяють руйнуванню складних органічних ланцюгів, аліфатичних та ароматичних сполук.	Висока ефективність окиснення нафтових вуглеводнів і важких фракцій, відмінні екологічні характеристики реагенту, а також можливість поєднання з біоремераціяєю для підвищення біодоступності залишків та зменшення молекулярної маси забруднювальних речовин.	Реагент розкладається на воду та кисень; вимагає кислого середовища (рН); надмірна концентрація може пригнічувати ґрунтову мікрофлору.
Озонування	Озон є сильним окисником, який реагує як безпосередньо, так	Ефективне руйнування структури поверхнево-	Екологічно безпечний метод; озон розпадається до молекулярного

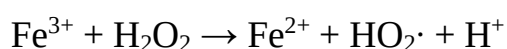
	і через утворення вторинних активних радикалів з ненасиченими та ароматичними сполуками.	активних речовин (ПАР) та зменшення рівня загального органічного вуглецю відбувається без утворення токсичних вторинних продуктів.	кисню; ефективність процесу обмежена вологістю та щільністю ґрунту.
--	--	--	---

Процес Фентона вважається одним із найбільш ефективних способів окиснення при очищенні від нафтових вуглеводнів. Він базується на каталітичному розкладанні гідроген пероксиду за участю іонів Fe(II), що призводить до утворення гідроксильних радикалів із високим окисним потенціалом. Ці радикали здатні руйнувати як аліфатичні, так і ароматичні структури вуглеводневих молекул, зокрема складні важкі фракції й поліциклічні ароматичні вуглеводні. Дослідження засвідчують значне зменшення концентрацій загальних нафтових вуглеводнів уже на ранніх етапах процесу [35].

Реакція Фентона, утворення гідроксильних радикалів із пероксиду водню за участю Fe^{2+} включає на першому етапі розклад гідроген пероксиду за допомогою каталітичної дії йонів Fe^{2+} до утворення гідроксильного радикала та гідроксид-йона за рівнянням:

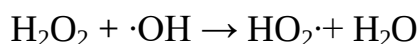


Далі відбувається регенерація іонів Fe^{2+} , що забезпечує циклічність процесу. Йон Феруму (III) взаємодіє з гідроген пероксидом з утворенням Fe^{2+} , гідропероксильного радикала ($\text{HO}_2\cdot$) та протона:

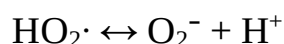


Ферум повертається в активну форму, підтримуючи перебіг реакції.

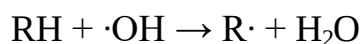
У системі також можливі побічні радикальні процеси. Зокрема, гідроксильний радикал може взаємодіяти з гідроген пероксидом з утворенням гідропероксильного радикала:



Гідропероксильний радикал, у свою чергу, перебуває в рівновазі з кисневим радикалом:



Основне практичне значення реакції Фентона полягає в окисненні органічних речовин. Гідроксильний радикал атакує органічні молекули (RH), ініціюючи їх радикальне руйнування:



Утворені органічні радикали зазнають подальшого окиснення до кінцевих продуктів – вуглекислого газу, води та мінеральних сполук.



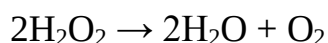
Однак ефективність цього методу значною мірою залежить від фізико-хімічних характеристик ґрунту. Найінтенсивніше утворення гідроксильних радикалів здійснюється в кислому середовищі, що вимагає відповідного коригування рН до обробки. За оптимальних умов досягається високий рівень окиснення вуглеводневих сполук. Проте застосування надмірної кількості реагентів може мати деструктивний вплив на ґрунтову екосистему. Комбінація процесу Фентона з біоремедіацією довела свою ефективність у підвищенні біодоступності залишкових нафтових вуглеводнів і активації їх мікробного розкладу [36].

Значний інтерес у сучасній науковій літературі викликають модифікації процесу Фентона, які реалізуються із застосуванням альтернативних джерел катіонів Fe^{2+} або інших окисників. Зокрема, використання Феруму, що міститься у ґрунті, як каталізатора дозволяє скоротити витрати реагентів і мінімізувати негативний вплив на екосистему ґрунту. Таке удосконалення значно розширює застосування методу та сприяє його екологічній адаптації [37].

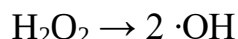
Пероксидні системи з використанням гідроген пероксиду також широко застосовують як у ролі самостійного агенту окиснення, так і в комбінації з іншими методами ремедіації. Гідроген пероксиду відзначається високими екологічними властивостями через розкладання на воду та кисень. У ґрунті він забезпечує як пряме окиснення забруднювачів, так і генерацію активних кисневих радикалів, що каталізують розрив складних органічних ланцюгів. Особливо ефективними пероксидні системи показали себе в ліквідації стійких нафтових та пірозабруднень [38].

Гідроген пероксид (H_2O_2) є ефективним окисником, який широко застосовується у процесах очищення води та деградації органічних забруднювачів. Його дія реалізується через два основні механізми: пряме окиснення та радикальне руйнування.

Першим етапом є розклад гідроген пероксиду, який може відбуватися самочинно або під впливом зовнішніх факторів. У результаті цього процесу утворюються вода та кисень:



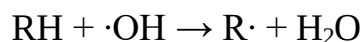
Другий етап – утворення гідроксильних радикалів ($\cdot\text{OH}$), які є надзвичайно реакційно здатними частинками. Вони можуть утворюватися як у результаті гомолітичного розпаду H_2O_2 , так і за участю каталізаторів (йонів металів, світла тощо):



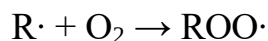
За наявності іонів перехідних металів процес може відбуватися за механізмом, подібним до реакції Фентона:



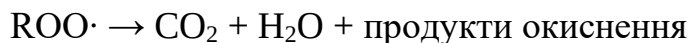
Утворені гідроксильні радикали ініціюють радикальне окиснення органічних сполук. На першій стадії відбувається відрив атома Гідрогену від органічної молекули:



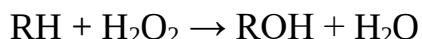
Далі органічний радикал реагує з киснем із утворенням пероксидного радикала:



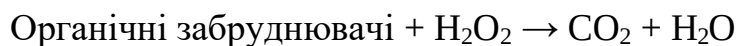
Ці проміжні сполуки зазнають подальших перетворень, що зрештою призводить до мінералізації органічних речовин із утворенням вуглекислого газу, води та інших проміжних продуктів:



Окрім радикального механізму, можливе також пряме окиснення органічних сполук гідроген пероксидом, хоча цей процес є повільнішим:



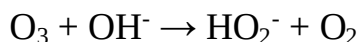
Дія гідроген пероксиду в пероксидних системах призводить до окиснення та руйнування органічних забруднювачів до кінцевих продуктів – вуглекислого газу та води:



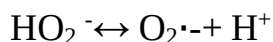
Пероксидні методи мають значну перевагу завдяки своїй здатності інтегруватися з іншими технологіями очищення, такими як біоремедіація та сорбційні методи. Процес окиснення зменшує молекулярну масу забруднювачів і перетворює їх у більш мобільні та біодоступні форми, що істотно підвищує ефективність подальших етапів очищення. Однак важливо враховувати, що надмірна концентрація гідроген пероксиду може негативно впливати на ґрунтову мікрофлору, тому процес потребує чіткого контролю параметрів [34].

Озонування є ще одним прогресивним хімічним методом для очищення ґрунтів від нафтопродуктів і органічних сполук, які виникають під час процесів горіння чи вибухів. Озон, будучи надзвичайно потужним окисником, активно взаємодіє з ненасиченими та ароматичними сполуками, руйнуючи їх структуру. У ґрунті озон може працювати безпосередньо або через утворення вторинних активних радикалів, що значно посилює результат окиснення. Дослідження цього методу демонструють суттєве зменшення загального вмісту Карбону та поліциклічних ароматичних вуглеводнів після його застосування [37].

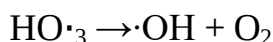
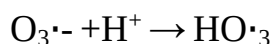
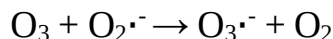
У водному середовищі озон здатний розкладатися з утворенням радикалів. Процес починається з реакції озону з гідроксид-йонами з утворенням гідропероксид-йона та молекулярного кисню.



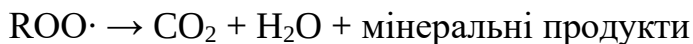
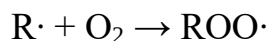
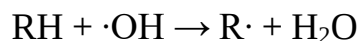
Утворений гідропероксид-йон дисоціює з утворенням кисневий радикал, який є активною формою кисню з неспареним електроном.



Далі кисневий радикал взаємодіє з озоном, у результаті чого формуються проміжні радикальні частинки. У кислому середовищі вони переходять у гідропероксидний радикал, розклад якого є ключовим етапом процесу і приводить до утворення гідроксильного радикала:



Утворені гідроксильні радикали є сильними неселективними окисниками і активно взаємодіють з органічними речовинами. Вони відщеплюють атом Гідрогену від органічної молекули з утворенням органічного радикала, який у присутності кисню переходить у пероксидний радикал. Подальші перетворення цих частинок призводять до глибокого окиснення органічних сполук з утворенням кінцевих продуктів мінералізації, зокрема карбон (IV) оксид, води та інших мінеральних компонентів.



Утім, ефективність озонування залежить від таких факторів, як вологість ґрунту, його гранулометричний склад та вміст органічної речовини. У щільних або надмірно зволжених ґрунтах можливості проникнення озону обмежені, що знижує ступінь окиснення забруднювачів.

Незважаючи на ці виклики, цей метод вважається екологічно безпечним, адже після завершення реакцій озон розпадається до молекулярного кисню і не утворює токсичних вторинних продуктів [38].

Незважаючи на високу ефективність хімічно-окисативних методів у руйнуванні нафтопродуктів і продуктів згоряння вибухових речовин, їх використання може бути обмежене специфічними фізико-хімічними характеристиками ґрунтів, глибиною поширення забруднень і необхідністю моніторингу вторинних реакцій. У ситуаціях, де процеси окиснення виявляються недостатньо ефективними або їх реалізація є технічно ускладненою, доцільно звертатися до термічних чи інших фізико-хімічних методів. Ці методи спрямовані на забезпечення повного видалення або деструкції стійких органічних сполук, що становить важливий аспект екологічної безпеки й відновлення забруднених територій.

2.5. Термодеструкція та інші фізико-хімічні методи

Термодеструкція й інші фізико-хімічні методи належать до інтенсивних технологій очищення ґрунтів, які спрямовані на термічне або фізико-хімічне руйнування та усунення органічних забруднювачів, таких як нафтопродукти і продукти неповного згоряння вибухових речовин. Вони використовуються у випадках, коли традиційні біологічні або сорбційні підходи є недостатньо ефективними або коли необхідно швидко знизити рівень токсичних органічних сполук до припустимих норм (рис 2.3) [39].



Рис 2.3. Схема термодеструкційних та інших фізико-хімічних методів очищення ґрунтів

Термодеструкція ґрунтів передбачає обробку температурними режимами від 300 до 1000 °C, результатом чого стає розірвання хімічних зв'язків органічних забруднень та їх трансформація у менш токсичні або леткі сполуки. Цей метод особливо ефективний для очищення ґрунтів, що містять важкі фракції нафти, мазути чи продукти детонації вибухів, які мають стабільні ароматичні структури [40].

Одним із термічних методів є термічна десорбція, яка відбувається за нижчих температур у діапазоні 100–350 °C. Її механізм заснований на випаровуванні та видаленні летких і напівлетких органічних речовин зі структури ґрунту. Такий підхід дозволяє знижувати концентрацію нафтопродуктів, майже не порушуючи мінеральну складову ґрунту; метод застосовується як на місці (in situ), так і з вийманням ґрунту (ex situ) [41].

Для ґрунтів, забруднених продуктами вибухів, як-от тринітротолуол, гексоген чи похідні їх термічного розкладу, ефективним є піроліз. Цей процес проводиться в анаеробних умовах і забезпечує глибоке перетворення нітросполук із утворенням газоподібних та твердих інертних залишків, значно знижуючи токсичність обробленого ґрунту (рис 2.4, рис. 2.5) [39].

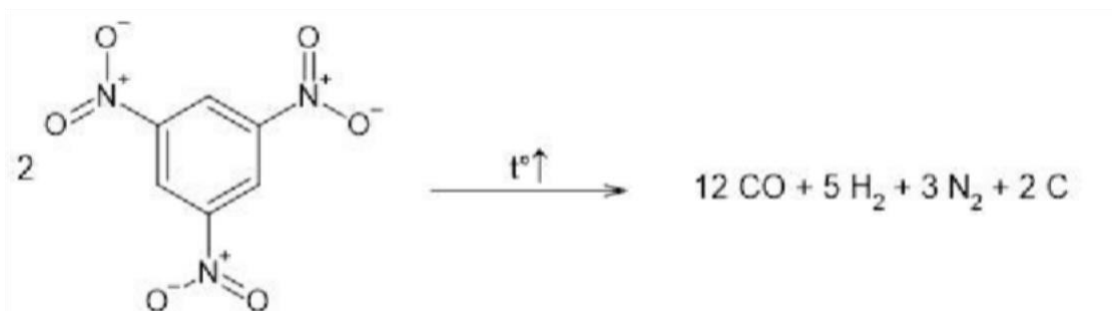


Рис 2.4. Піроліз тротилу

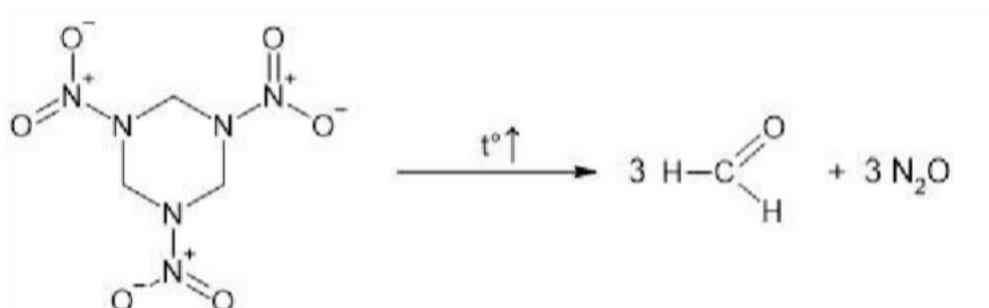


Рис 2.5. Піроліз гексогену

Серед інших фізико-хімічних підходів вирізняються електрохімічна обробка, хімічна стабілізація та промивання ґрунтів. Електрохімічні методи сприяють переміщенню забруднювачів у спеціальні зони збору, а промивання дає змогу витягувати нафтові компоненти за допомогою поверхнево-активних речовин чи органічних розчинників [42].

Ефективність термодеструкції та фізико-хімічного очищення залежить від гранулометричного складу ґрунту, вологості, вмісту органічної речовини та природи забруднення. Хоча ці технології є енергозатратними й дорогими, вони здатні забезпечити швидке і всебічне очищення ґрунтів, що робить їх актуальними для рекультивації пошкоджених територій, особливо тих, які постраждали від військових конфліктів [40].

Термодеструкція та інші фізико-хімічні методи довели свою ефективність у руйнуванні стійких органічних забруднювачів, таких як нафтопродукти та залишки згоряння вибухових речовин. Однак їхнє практичне використання часто стримується через значні енергетичні витрати та можливий негативний вплив на властивості ґрунту. У зв'язку з цим все більшої популярності набуває застосування комбінованих технологій

очищення, які інтегрують фізичні, хімічні та біологічні методи. Це дозволяє досягти синергічного ефекту і значно підвищити загальну ефективність процесу відновлення ґрунтів.

2.6. Комбіновані технології: синергічні системи очищення

Комбіновані системи очищення застосовують для ефективного видалення забруднювачів, об'єднуючи кілька методів ремедіації в послідовній або паралельній формі. Кожен етап у такій системі підсилює ефективність наступного. Наприклад, початкова фізико-хімічна обробка ґрунту сприяє руйнуванню складних органічних молекул або зменшенню їхньої молекулярної маси. Це, у свою чергу, робить шкідливі речовини більш доступними для мікроорганізмів-деструкторів, що значно прискорює процес очищення і знижує залишкову токсичність ґрунтів (рис 2.6) [43].



Рис 2.6. Поєднання фізико-хімічних методів відновлення забруднених ґрунтів

Популярним методом є комбінація сорбційних і хімічних технологій. Природні чи модифіковані сорбенти (наприклад, цеоліти, бентоніти, активоване вугілля, біочар) допомагають локалізувати нафтопродукти і продукти згорання вибухових речовин у ґрунті. Це зменшує їхню міграцію і екологічні ризики. Наступний етап – хімічне окиснення, наприклад за

допомогою гідроген пероксиду або озону, руйнує органічні сполуки, що закріпилися на сорбентах, без необхідності вилучення ґрунту [44].

Поєднання хімічних методів із біоремедіацією також набуває популярності. Вплив гідроген пероксиду або озону на складні вуглеводневі сполуки сприяє їх частковій деструкції та утворенню менш токсичних і доступних для подальшого розкладання продуктів. Це відкриває можливості для активації мікробіологічних процесів, які завершують розщеплення органічних забруднювачів до мінералів. Такий підхід забезпечує високий рівень очищення ґрунтів у стислі строки [45].

Інтеграція фіторемедіаційних способів додає додаткову перспективу комбінації технологій очищення. Рослини-гіперакумулятори здатні вбирати залишкові забрудники нафти або продукти розпаду вибухових речовин. Їхні кореневі системи стимулюють діяльність корисної ризосферної мікрофлори. Фізико-хімічна або сорбційна попередня обробка знижує концентрацію токсикантів до рівнів, безпечних для росту рослин. Це значно підвищує ефективність фіторемедіації та сприяє відновленню родючості ґрунту [46].

Основною перевагою комбінованих технологій є можливість адаптації їх до конкретних умов забруднення та властивостей ґрунту. Концентрація забрудників, глибина проникнення шкідливих речовин і фізико-хімічні характеристики місцевості визначають оптимальну послідовність методів. Така гнучкість сприяє ощадливому використанню ресурсів і мінімізації шкоди для екології. Зазначений підхід є особливо цінним для реабілітації територій, що постраждали внаслідок воєнних дій [43].

Втім, застосування таких комбінованих систем вимагає ретельного наукового обґрунтування та попереднього оцінювання потенційних екологічних ризиків. Неправильна комбінація методів може призвести до утворення вторинних токсичних сполук або зниження активності ґрунтових мікроорганізмів. Тому впровадження подібних технологій потребує постійного моніторингу стану ґрунту, аналізу ефективності окремих етапів і своєчасного внесення коригувань у технологічні параметри [44].

Комбіновані технології очищення ґрунтів, що інтегрують сорбційні, хімічно-оксидативні, біологічні та фіторе mediaційні підходи, становлять один із найбільш прогресивних напрямів у сфері ремедіації територій, забруднених нафтопродуктами та продуктами згорання вибухових речовин. Застосування таких інтегрованих систем дозволяє досягати синергічного ефекту, який забезпечує підвищену ефективність очищення, суттєве скорочення тривалості відновлювальних робіт і сприяє створенню умов для екологічно безпечної реабілітації порушених земельних ресурсів [45].

Комбіновані технології ремедіації ґрунтів, які інтегрують фізичні, хімічні та біологічні методи, демонструють значний потенціал у ефективній нейтралізації нафтопродуктів та продуктів згорання вибухових речовин. Однак вибір найбільш дієвих технологічних підходів, їх масштабування та оцінка довгострокового впливу залежать від практичного досвіду їх впровадження в різних країнах світу. Це підкреслює важливість проведення ретельного аналізу міжнародного досвіду і визначення можливостей адаптації інноваційних технологій ремедіації до специфічних умов України.

РОЗДІЛ 3

МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В УКРАЇНІ

3.1. Очищення ґрунтів у зонах воєнних конфліктів: досвід Балкан, Іраку, Кувейту

Військові конфлікти нерідко залишають глибокий відбиток на стані екології, особливо забруднюючи ґрунти різноманітними токсичними речовинами – нафтопродуктами, продуктами згоряння вибухівки, важкими металами та іншими шкідливими сполуками. Ці екологічні наслідки яскраво проявилися на Балканах, у Перській затоці та в Іраку, де бойові дії спричиняли руйнування нафтових і нафтопереробних об'єктів, масштабні пожежі на свердловинах та розливи нафти (табл. 3.1) [47, 48].

Таблиця 3.1

Міжнародний досвід очищення територій, забруднених унаслідок військових дій

Територія	Забруднювачі	Шляхи очищення
Балкани	Нафтопродукти, хлорорганічні сполуки, поліциклічні ароматичні вуглеводні, продукти згоряння вибухівки, важкі метали	Пілотні проекти з ремедіації ґрунту та підземних вод, розроблення стратегій очищення на основі оцінки ризиків
Кувейт	Нафта (важкі компоненти та легкі фракції), нафтові озера.	Комплексне оцінювання, геохімічний моніторинг, біоремедіація, десорбційні методи, природне випаровування легких фракцій
Ірак	Нафтові речовини, токсичні сполуки в	Відбір проб, аналіз ризиків, вибір технологій

	«гарячих точках»	ремедіації, навчання місцевих фахівців
--	------------------	--

На Балканах у 1990-х роках військові конфлікти суттєво вплинули на великі території, зокрема забруднення ґрунтів нафтовими продуктами, хлорорганічними сполуками й поліциклічними ароматичними вуглеводнями. Поблизу Панчево (Сербія) внаслідок руйнування промислових об'єктів відбулися викиди токсичних речовин у довкілля, зокрема в ґрунти та підземні води. До процесу моніторингу рівня забруднення, оцінки ризиків для здоров'я населення та розробки методів очищення постраждалих територій були залучені міжнародні організації, зокрема Програма ООН з навколишнього середовища (UNEP). [48].

Кувейт після Першої війни (1990 - 1991 рр.) в Перській затоці став яскравим прикладом масштабної боротьби з наслідками екологічної катастрофи. Під час бойових дій знищені нафтові свердловини призвели до утворення сотень «нафтових озер», що вкрили десятки квадратних кілометрів пустелі й загрожували місцевим екосистемам і водним ресурсам. Підхід Кувейту до очищення включав комплексне оцінювання масштабів забруднення, геохімічний моніторинг і застосування різноманітних ремедіаційних технологій, таких як біоремедіація та десорбційні методи. Пустельний клімат сприяв випаровуванню легких фракцій нафти, в той час як очищення важчих компонентів вимагало активного втручання [47, 49].

В Іраку військові конфлікти 1990-х і 2000-х років залишили за собою численні «гарячі точки» забруднення ґрунтів нафтовими речовинами. Згідно із даними Всесвітнього банку, ці пошкоджені території стали значним викликом для процесу відновлення країни й можуть залишатися екологічною проблемою протягом тривалого часу без належного плану ремедіації. UNEP разом із партнерами реалізували проекти з оцінювання таких зон, залучивши місцевих фахівців до навчання у сфері відбору проб, аналізу ризиків та вибору технологій очищення [50, 51].

Ефективна стратегія постконфліктного очищення ґрунтів має базуватися на інтегрованому підході: комплексному аналізі забруднення, ретельному виборі технологій ремедіації та активній співпраці між місцевими громадами й міжнародними організаціями. Як показує досвід Кувейту, успішна реалізація таких програм потребує планування й координації на державному рівні, значних фінансових вкладень і врахування особливостей природних умов регіону. Це дозволяє досягнути економічно ефективного очищення навіть великих ділянок землі [47].

Досвід Балканських країн виразно демонструє важливість міжнародної співпраці, адже локальні ресурси часто є недостатніми для ефективного та всебічного вирішення існуючих екологічних проблем. У рамках міжнародних програм реалізовувалися пілотні проекти, котрі охоплювали такі заходи, як оцінювання стану ґрунтів, розроблення стратегій очищення та впровадження технологій ремедіації для ґрунту і підземних вод. Проте масштаб і швидкість виконання таких робіт залишалися обмеженими через недостатнє фінансування і обмежені інституційні спроможності [48, 52].

Аналіз практик з очищення ґрунтів у регіонах, постраждалих від військових конфліктів, зокрема на Балканах, в Іраку та Кувейті, свідчить про те, що успішність відновлення забруднених територій значною мірою зумовлена не лише вибором відповідних технологій, але й запровадженням системного підходу до оцінки ризиків, планування та моніторингу ремедіаційних заходів. У зв'язку з цим особливого значення набуває орієнтація на міжнародні стандарти та рекомендації, розроблені авторитетними екологічними інституціями, такими як Програма ООН з навколишнього середовища (UNEP) та Агентство з охорони довкілля США (EPA). Ці документи систематизують глобальний досвід і пропонують уніфіковані методологічні підходи до вирішення проблеми забруднення територій.

3.2. Рекомендації UNEP, EPA щодо ремедіації забруднених територій

Організація Об'єднаних Націй через Програму ООН з навколишнього середовища (UNEP) визначає забруднення ґрунтів як одну з найсерйозніших загроз як для здоров'я екосистем, так і для людей. Це явище безпосередньо впливає на реалізацію цілей сталого розвитку, включно із забезпеченням продовольчої безпеки та якістю питної води. Для вирішення цієї проблеми необхідний комплексний підхід, який охоплює очищення та відновлення територій, проведення систематичної оцінки ризиків, моніторинг і ефективне управління даними про стан ґрунтів (рис 3.1) [53 , 54].



Рис 3.1. Рекомендації UNEP та EPA для ремедіації ґрунтів

У Global Assessment of Soil Pollution UNEP наголошує на важливості впровадження багатовекторних заходів. Серед них – стандартизація процедур оцінки забруднення, розробка національних стратегій моніторингу й ремедіації, а також активна участь різноманітних зацікавлених сторін, зокрема громадських організацій, наукової спільноти та місцевих громад. Одним із ключових аспектів рекомендацій є інтеграція даних про стан ґрунтів у процеси прийняття рішень на державному рівні. Це включає встановлення регуляторних норм щодо допустимих концентрацій

забруднювачів і створення цільових програм відновлення деградованих земель [53, 54].

Основні принципи Програми ООН з навколишнього середовища (UNEP) охоплюють превенцію забруднення та сталий підхід до управління ґрунтовими ресурсами. UNEP наголошує на необхідності запобігати потраплянню токсичних речовин у ґрунт, акцентуючи увагу на впровадженні кращих практик управління хімічними речовинами й відходами, а також інтеграції принципу «забруднювач платить» у національні політики. Ці ініціативи тісно пов'язані з глобальними зусиллями щодо мінімізації впливу забруднень на здоров'я людей і довкілля, а також узгоджуються з підходами інтегрованого управління хімічними ризиками [53].

У США Агентство з охорони довкілля (EPA) накопичило значний практичний досвід у розробці та виборі технологій для очищення територій, забруднених складними органічними й неорганічними сполуками, включаючи нафтопродукти та інші токсиканти. EPA пропонує детальні описи методів очищення ґрунту й води, які можуть застосовуватися як на етапі планування, так і під час реалізації ремедіаційних проектів. Ці методи включають широкий спектр технологій – від фізико-хімічних, таких як виймання ґрунту, промивання, термічна обробка і стабілізація, до біотехнологій, таких як біоремедіація та фіторемедіація [55].

EPA розробляє та поширює інструктивні матеріали щодо специфічних підходів у ремедіації, пристосованих до різних типів територій і забруднювачів. Ці документи включають детальні методичні рекомендації з оцінки ризиків, вибору оптимальних технологій, враховуючи фізико-хімічні особливості ґрунтів, характеристики забруднюючих речовин і очікувані результати очищення. Така деталізація сприяє системному впровадженню ремедіаційних заходів і значно зменшує невизначеність у процесі прийняття технічних рішень [56].

Стратегічний підхід ЕРА охоплює не лише технічні аспекти, а й принципи управління проєктами у сфері ремедіації. Це включає всі етапи: від первинної оцінки та моніторингу до реалізації заходів і подальшого контролю їхньої ефективності. У випадках складних умов ЕРА рекомендує застосовувати комбіновані або гібридні технології, які забезпечують кращі результати, особливо тоді, коли використання одного методу є недостатньо ефективним для гарантування як екологічної безпеки, так і здоров'я людей [55].

У підсумку, рекомендації UNEP та ЕРА з очищення забруднених ґрунтів охоплюють як загальні політичні та стратегічні засади дій, так і конкретні технологічні й методичні вказівки, які можуть бути адаптовані до локальних умов. Для України та інших постконфліктних регіонів ці поради можуть стати основою для створення національних стратегій, що включатимуть оцінювання забруднення, системи моніторингу та вибір методів очищення ґрунтів. Такий підхід також сприятиме міжсекторальній координації та забезпечить ефективне впровадження програм ремедіації [54].

Рекомендації, розроблені Програмою ООН з навколишнього середовища (UNEP) та Агенцією з охорони довкілля США (ЕРА), служать методологічною основою для вибору і реалізації заходів з очищення забруднених територій. Однак їх ефективність на практиці залежить від ступеня адаптації до конкретних природно-кліматичних, соціально-економічних і інституційних реалій кожної країни. У цьому контексті особливо важливим є детальний аналіз можливостей впровадження сучасних технологій ремедіації ґрунтів в Україні. Такий аналіз повинен враховувати масштаби забруднень, спричинених військовими діями, доступність ресурсів і специфіку національної законодавчої бази.

3.3. Потенційні можливості впровадження технологій в Україні

Масштабне забруднення ґрунтів в Україні, спричинене бойовими діями, наголошує на необхідності впровадження ефективних, науково обґрунтованих і економічно виправданих технологій ремедіації. Великі площі земель виявилися уражені нафтопродуктами, продуктами згоряння вибухових речовин, токсичними органічними сполуками та важкими металами, що становить серйозну загрозу для сільського господарства, водних ресурсів і здоров'я населення. Водночас у країні існує потенціал для адаптації та широкого впровадження прогресивних технологій очищення ґрунтів, які успішно використовуються на міжнародному рівні (табл. 3.2) [54, 55].

Таблиця 3.2

Сучасні проєкти з відновлення забруднених ґрунтів та їх результати

Проєкт для відновлення ґрунтів	Регіон впровадження	Цільові забруднювачі	Результати досліджень
War - Polluted Soil: Recovery and Remediation	Зони бойових дій в Україні (понад 4000 га)	Органічні та неорганічні забруднювачі	Створення описувальних карт забруднень, детальний аналіз територій та підготовка рекомендацій для подальшого відновлення
Фіторемедіація з використанням рослин-аккумуляторів	Бориславський район (Львівщина)	Нафтопродукти	Екологічно безпечне зменшення концентрації вуглеводнів у ґрунті без використання складного технічного обладнання
Стабілізація з використанням гумінових речовин та	Райони зі складною технічною рекультивацією	Токсичні сполуки	Ефективне обмеження міграції токсинів у довкіллі та значне поліпшення фізико-

фіторе mediaції			хімічних властивостей земель
Гармонізація національних підходів через освітні програми	Україна	Широкий спектр забруднювачів	Підвищення готовності до впровадження інноваційних рішень та активний розвиток людського капіталу в сфері ремедіації

Значну перспективу для України становить гармонійне поєднання міжнародних рекомендацій UNEP та ЕРА із національними розробками та ресурсами. Підходи UNEP передбачають інвентаризацію забруднених територій, оцінювання ризиків, вибір адекватних методів ремедіації й організацію довгострокового моніторингу стану ґрунтів [55]. У документах ЕРА акцент робиться на комплексному застосуванні фізико-хімічних, біологічних та технічних методів залежно від характеру забруднення і геологічних умов [56].

Перші кроки до реалізації таких підходів у країні вже зроблено в рамках міжнародних проєктів. Особливого значення набув проєкт «War-Polluted Soil: Recovery and Remediation», метою якого є вивчення забруднених земель у зонах бойових дій. У його рамках здійснюється аналіз органічних і неорганічних забруднювачів, створення карт забруднених територій та підготовка рекомендацій щодо відновлення понад 4000 гектарів землі в різних регіонах України. Ця діяльність закладає основу для масштабного впровадження сучасних технологій очищення [57].

Особливий потенціал у сфері ремедіації мають біологічні методи, зокрема біоре mediaція та фіторе mediaція. Ці методи відрізняються відносною доступністю, екологічною безпекою та можливістю використання на значних територіях. У Бориславському районі дослідження на нафтових забруднених землях вже продемонстрували ефективність застосування рослин-аккумуляторів для зменшення концентрації нафтових вуглеводнів без

додаткового складного обладнання. Отримані результати підтверджують перспективність використання цих підходів на постраждалих від війни територіях [58].

Крім біологічних методів, в Україні розробляють підходи щодо стабілізації та зменшення мобільності забруднювачів у ґрунті. Використання гумінових речовин на основі природних гуматів разом із фіторе mediaцією дозволяє обмежити міграцію токсичних сполук і поліпшити фізико-хімічні властивості земель. Це особливо актуально для районів, де технічна рекультивация є складною або надто затратною [59].

Розвиток людського та інституційного капіталу є ключовим елементом для успішного впровадження технологій очищення довкілля. Українські експерти активно залучені до міжнародних освітніх програм і обміну досвідом, що стосується оцінки рівня забруднення ґрунтів і впровадження ефективних технологій ремедіації. Зокрема, участь у ініціативах під егідою FAO та Global Soil Partnership сприяє гармонізації національних підходів із загальновизнаними світовими стандартами, а також значно підвищує готовність до застосування складних інноваційних рішень на практиці [60].

Аналіз можливостей впровадження технологій ремедіації в Україні підкреслює важливість їх подальшого вивчення з погляду доцільності та ефективності застосування. У цьому процесі ключову роль відіграють економічні й екологічні аспекти, які визначають вибір найкращих рішень для очищення забруднених ґрунтів. Особливу актуальність це питання набуває в умовах обмежених ресурсів та необхідності післявоєнного відновлення.

3.3. Перспективи застосування методів очищення ґрунтів

Вибір технологій для очищення ґрунтів, забруднених нафтопродуктами та продуктами згоряння вибухових речовин, обов'язково має базуватися не тільки на їхній технічній ефективності, але також на

комплексному аналізі економічної доцільності та екологічної безпеки. Особливо актуальними ці критерії стають в умовах постконфліктного відновлення, як у випадку з Україною. Ситуацію ускладнюють обмежені фінансові ресурси, значні площі забруднень і нагальна потреба швидкого повернення земель у сільськогосподарський обіг (табл. 3.3) [54].

Таблиця 3.3

**Аналіз сучасних технологій ремедіації ґрунтів з урахуванням їх
часової ефективності**

Метод	Сутність методу	Короткострокові перспективи	Довгострокові перспективи
Комбіновані технології	Поєднання сорбційних, біологічних та фізико-хімічних методів у поетапні схеми ремедіації	Оптимізація витрат, скорочення тривалості процесів очищення порівняно з суто біологічними методами	Забезпечення екологічної стійкості, відновлення ґрунтових ресурсів та мінімізація впливу на довкілля; найбільш раціональний підхід для масштабного відновлення
Біоремедіація та фіторемедіація	Використання біологічного потенціалу мікроорганізмів та рослин для дезактивації забруднень без вилучення ґрунту	Низькі капітальні витрати; значна тривалість процесу очищення, залежність від кліматичних факторів	Екологічна безпека, збереження родючості ґрунту; висока економічна доцільність для очищення великих площ із помірним забрудненням
Сорбційні технології	Застосування природних або модифікованих сорбентів для зв'язування	Економічна вигідність (особливо при використанні місцевої сировини), середня швидкість очищення	Екологічна стійкість, можливість стабілізації забруднень на початкових етапах;

	нафтопродуктів та токсинів		баланс між витратами та ефективністю при масштабному застосування
Термічні та фізико-хімічні методи	Використання термічного впливу та хімічних оксидантів для швидкого руйнування забруднювачів	Висока швидкість і якість очищення; вимагають значних початкових витрат, складного обладнання та енергоресурсів	Можлива деградація структури ґрунту, зниження біологічної активності, ризик виникнення вторинних забруднень; економічно доцільні лише для локальних зон значного забруднення

Економічна ефективність технологій ремедіації ґрунтів залежить від сукупності витрат на проектування, реалізацію, експлуатацію і моніторинг, а також від втрат через зниження продуктивності земель. Найбільш дорогими методами залишаються фізико-хімічні та термічні способи, як-от термодеструкція, ґрунтопромивання і хімічно-оксидативні процеси (наприклад, процес Фентона чи озонування). Ці підходи забезпечують високу швидкість і якість очищення, але вимагають значних матеріальних та енергетичних ресурсів, використання складного обладнання і залучення висококваліфікованого персоналу, що суттєво підвищує їхню вартість [55].

Біологічні методи очищення, серед яких біоремедіація і фіторемедіація, є значно дешевшими за капітальними витратами. Вони мають перевагу в можливості використання без вилучення ґрунту і за допомогою місцевих ресурсів, що робить їх привабливими для дезактивації

великих площ із помірним рівнем забруднення. Водночас суттєвим недоліком цих методів залишається тривалість процесу очищення, а їх ефективність суттєво залежить від кліматичних факторів і властивостей ґрунту [43].

Сорбційні технології представляють собою компроміс між витратами і ефективністю. Застосування природних сорбентів, наприклад торфу, цеолітів, бентонітів чи біочару, є економічно вигідним, особливо за умови використання місцевої сировини або її локального виробництва. Водночас модифіковані сорбенти можуть підвищити вартість процедур очищення, але забезпечують значно кращу ефективність у знешкодженні нафтопродуктів та токсичних органічних сполук [33].

Оцінка екологічної безпеки методів очищення ґрунтів базується на врахуванні їхнього впливу на ґрунтові екосистеми, біорізноманіття, водні ресурси та атмосферу. Хоча фізико-хімічні та термічні технології характеризуються високою ефективністю, їх використання може спричиняти деградацію структури ґрунту, зниження біологічної активності і виникнення вторинних забруднень, включно з продуктами неповного окиснення органічних сполук [60].

Хімічні технології, як, наприклад, процес Фентона, потребують підвищеної екологічної обережності. Вони здатні змінювати кислотність ґрунту і створювати реактивні проміжні продукти. У цьому контексті міжнародні рекомендації акцентують увагу на необхідності суворого контролю параметрів таких процесів і пропонують їх комбінувати з біологічною рекультивацією на завершальному етапі [34].

Сучасні підходи до ремедіації ґрунтів все частіше ґрунтуються на концепції стратегії, яка поєднує економічну раціональність із забезпеченням екологічної безпеки. Інтеграція комбінованих технологій, що охоплюють сорбційні, біологічні та фізико-хімічні методи, сприяє зменшенню вартості реалізації заходів шляхом скорочення тривалості процесів очищення та мінімізації впливу на навколишнє середовище [46].

Особливу перспективність для України демонструють поетапні схеми ремедіації, що передбачають використання економічно доступних і екологічно безпечних підходів на початкових етапах, таких як стабілізація та біоремедіація. У подальшому більш затратні фізико-хімічні технології застосовуються вибірково у зонах значного забруднення. Даний методологічний підхід відповідає рекомендаціям Програми ООН з навколишнього середовища (UNEP) та Агентства з охорони навколишнього середовища США (EPA), забезпечуючи оптимізацію витрат без втрати екологічної ефективності робіт зі збереження й відновлення ґрунтових ресурсів [53, 55].

Тому, економічні та екологічні аспекти технологій ремедіації є тісно взаємопов'язаними та потребують комплексного аналізу. Оптимальний вибір технології залежить від характеру і ступеня забруднення, масштабу уражених територій, фінансових можливостей і екологічних пріоритетів. Для України найбільш раціональним рішенням є інтеграція маловитратних біологічних і сорбційних методів із локалізованим застосуванням високоефективних фізико-хімічних технологій, що сприяє досягненню балансу між економічною ефективністю і екологічною стійкістю.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано основні джерела та типи забруднення ґрунтів нафтопродуктами та продуктами згоряння вибухових речовин, що виникають унаслідок воєнних дій в Україні, зокрема через руйнування інфраструктурних об'єктів, виникнення пожеж і детонацію боєприпасів. Визначено, що характер забруднення є комплексним і проявляється у різних формах, включаючи хімічне забруднення (внаслідок накопичення токсичних органічних і неорганічних сполук), механічне пошкодження (утворення уламків боєприпасів та залишків техніки), фізичне впливання (зміна структури та ущільнення ґрунту під час вибухів), а також їхній комбінований вплив.

2. З'ясовано, що продукти згоряння вибухових речовин і нафтопродукти мають складний хімічний склад, високу токсичність і стійкість у ґрунті. Найбільшу загрозу становлять нітроароматичні сполуки, поліциклічні ароматичні вуглеводні, а також оксиди Нітрогену та Карбону, здатні сорбуватися гумусовими речовинами й мігрувати в профілі ґрунту. Встановлено, що органічні токсиканти пригнічують мікробіологічну активність, мінералізацію, гумусоутворення та розвиток рослин, а їх комбінований вплив підвищує екологічні ризики й ускладнює самоочищення ґрунтів.

3. Досліджено та оцінено сучасні технології очищення ґрунтів, зокрема біоремедіацію, фіторемедіацію, сорбційні, хімічно-оксидативні та фізико-хімічні методи з урахуванням їх ефективності, обмежень і сфер застосування. Встановлено, що біологічні методи є екологічно безпечними й економічно доцільними для великих площ із помірним забрудненням, однак повільні та залежать від природних умов; сорбційні – швидко знижують міграцію забрудників, але не забезпечують їх повного руйнування; фізико-хімічні та термічні – ефективні й швидкі, проте витратні та потенційно ризиковані для екосистем. Обґрунтовано доцільність застосування

комбінованих технологій як найбільш ефективного підходу до очищення ґрунтів, зокрема після військових дій.

4. Проаналізовано міжнародний досвід ремедіації територій, забруднених унаслідок воєнних конфліктів (Балкани, Ірак, Кувейт), який підтверджує, що ефективне очищення ґрунтів можливе за інтегрованого підходу, що включає оцінку забруднення, аналіз ризиків, моніторинг і застосування адаптованих технологій. Показано, що успішне відновлення залежить не лише від вибору методів, а й від міжнародної співпраці, інституційної спроможності та фінансування. Рекомендації UNEP і ЕРА узагальнюють цей досвід і пропонують стандартизовані підходи до очищення, які можуть бути використані в післявоєнних екологічних програмах України з урахуванням національних умов.

5. Окреслено перспективи впровадження сучасних методів очищення ґрунтів в Україні шляхом інтеграції міжнародних рекомендацій, національних досліджень і доступних природних ресурсів у процесі післявоєнного відновлення. Визначено, що оптимальним є поетапний комбінований підхід: пріоритетне застосування біологічних і сорбційних методів на великих територіях із помірним забрудненням та локальне використання фізико-хімічних технологій у зонах підвищеного ризику. Підкреслено, що розвиток інституційної спроможності та міжнародна співпраця є основою екологічно безпечного й економічно ефективного відновлення ґрунтових ресурсів України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Богатиренко А.А., Чорний І. Б., Нестеровський В.А. Хімія Землі. К. : Кондор-Видавництво, 2018. 568 с.
2. Dyniak O., Koshliakova I. Potential danger to the environment and population from petrochemical pollution of the geological environment as a result of military operations. *Ecological Sciences*. 2023. No. 6 (51). P. 136–141. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.22>
3. Corredor, D., Duchicela, J., Flores, F. J., Maya, M., & Guerron, E. (2024). Review of Explosive Contamination and Bioremediation: Insights from Microbial and Bio-Omic Approaches. *Toxics*, 12(4), 249. <https://doi.org/10.3390/toxics12040249>
4. Pichtel J. Distribution and Fate of Military Explosives and Propellants in Soil: A Review. *Applied and Environmental Soil Science*. 2012. Vol. 2012. P. 1–33. URL: <https://doi.org/10.1155/2012/617236>
5. Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. . Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review. *Sustainability*, 12(21), 9002. <https://doi.org/10.3390/su12219002>
6. Сплодитель А., Голубцов О., Чумаченко С., Сорокіна Л. Вплив війни Росії проти України на стан українських ґрунтів: результати аналізу : – Київ : ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. – 155 с. – URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii2.pdf>
7. 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 / Centre for Environmental Initiatives “Ecoaction”. – Київ, 2023. – 32 с. – URL: <https://en.ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/05/impact-on-soil-russian-war.pdf>
8. Novakovska I., Belousova N., Hunko L. Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio*

- Locorum. 2025. Vol. 24, no. 1. P. 129–145.
URL: <https://czasopisma.uwm.edu.pl/index.php/aspal/article/view/9788/8178>
9. Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine / L. Yashchenko et al. *European journal of environmental sciences*. 2025. Vol. 15, no. 1. P. 18–27. URL: <https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3>
10. Alsafran, M., Saleem, M.H., Al Jabri, H. et al. Principles and Applicability of Integrated Remediation Strategies for Heavy Metal Removal/Recovery from Contaminated Environments. *J Plant Growth Regul* 42, 3419–3440 (2023). URL: <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10803-1>
11. Influence of combat actions on the content of gross forms of heavy metals in the soils of Sumy and Okhtyrka districts of Sumy region / Y. Zaitsev та ін. *Agroecological journal*. 2022. № 3. С. 136–149. URL: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>
12. Shebanina, O., Kormyshkin, I., Bondar, A., Bulba, I., & Ualkhanov, B. (2024). Ukrainian soil pollution before and after the Russian invasion. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 208–215. <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2245288>
13. Yutilova, K., Shved, E., Rozantsev, G. et al. Russia–Ukraine war impacts on environment: warfare chemical pollution and recovery prospects. *Environ Sci Pollut Res* 32, 5685–5702 (2025). URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36098-9>
14. Krainiuk, O. V., Buts, Y. V., Ponomarenko, R. V., Asotskyi, V. V., DarmofalE. A., Kalynovskyi, A. Y., & Maniuk, V. V. (2025). Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 34(2), 304–317. URL: <https://doi.org/10.15421/112526>
15. Biyashev, B., Drobitko, A., Markova, N., Bondar, A., & Pismenniy, O. (2024). Chemical analysis of the state of Ukrainian soils in the combat zone. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 199–207. URL: <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2271754>

16. Geris R, Malta M, Soares LA, de Souza Neta LC, Pereira NS, Soares M, Reis VdS, Pereira MdG. A Review about the Mycoremediation of Soil Impacted by War-like Activities: Challenges and Gaps. *Journal of Fungi*. 2024; 10(2):94. <https://doi.org/10.3390/jof10020094>
17. Мазур С., Матусевич Г. Основа біоремедіації забруднених, внаслідок бойових дій, ґрунтів : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції VinSmartEco, 18–20 травня 2023 р. – URL: <https://docs.academia.vn.ua/handle/123456789/1344>
18. Мудрак О. В., Лавров В. В., Харченко С. О., Г. В. Мудрак. Екологічні наслідки воєнних дій для земельних ресурсів Снігурівської громади Миколаївської області : – Вінниця, Україна, 2025. – 18 с. – URL: <https://docs.academia.vn.ua/handle/123456789/1929>
19. Das N., Chandran P. Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants: An Overview. *Biotechnology Research International*. 2011. Vol. 2011. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.4061/2011/941810>
20. Vidali, M. (2001). Bioremediation. An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163-1172. <https://doi.org/10.1351/pac200173071163>
21. Azubuike, C.C., Chikere, C.B. & Okpokwasili, G.C. Bioremediation techniques–classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J Microbiol Biotechnol* 32, 180 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x>
22. Кулик Н. С. Біоремедіація ґрунтів, пошкоджених/забруднених внаслідок воєнних дій, за допомогою біопродуктів : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 101 - екологія / наук. кер. І. Ю. Аблєєва. Суми : Сумський державний університет, 2024. 63 с. – URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/cebe8c4f-8edd-4083-965e-b9123a1dc7a4/content>
23. Дацько О. М., Яценко В. М. Сучасні методи ремедіації ґрунтів. Фіторемедіація як ключ до очищення ґрунтів та збереження екосистем.

- Аграрні інновації. 2024. № 25. С. 20–24. URL: <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2024.25.3>
24. Гирля Л. М. Фіторемедіація – ефективний шлях зниження вмісту важких металів у ґрунтах – Наук. журн. «Екологія» (ChNU). – 2011. – URL: <http://ecology.chdu.edu.ua/article/view/64516>
25. Мельниченко В. В. Фіторемедіація в аспекті відновлення ґрунтів, які зазнали впливу воєннотехногенного навантаження : матеріали доповіді / Міжнародна науково-практична конференція «Післявоєнне відновлення ґрунтових і рослинних ресурсів та продовольча безпека країни» (м. Київ, 20–21 червня 2024 р.). – Київ : Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2024. – С. 184–190 – URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u391/abf-2024_0.pdf#page=184
26. Папуша Д. М., Салганов Л. Я., Шевченко І. О. Фіторемедіація як метод очищення забруднених ґрунтів внаслідок військових дій : тези доповіді / Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Екологічна безпека держави – 2023». – Київ : Національний авіаційний університет, 2023. – С. 83. – URL: <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/ess/article/download/18370/25586>
27. Фіторемедіаційне відновлення екологічного стану ґрунтів, забруднених нафтопродуктами / Л. Черняк та ін. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Екологія. Людина. Суспільство". 2024. С. 63–65. URL: <https://doi.org/10.20535/ehs2710-3315.2023.291018>
28. Khokhlov A., Khokhlova L. Purification of sandy soils from oil with the use of biosorption complexes. Ecological Sciences. 2020. Vol. 33, no. 6. P. 86–90. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.6-33.12>
29. Хохлов А. В., Гомеля М. Д., Хохлова Л. Й. Детоксикація важких металів у ґрунті застосуванням модифікованого біовугілля з рисового лушпиння / Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки, № 125, 2022, С. 33–40. – DOI: 10.32851/2226-0099.2022.125.33 – URL: https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/125_2022/33.pdf

30. Bingari H. S., Gibson A., Teeuw R. Sorption modelling of crude oil-contaminated soils using a derived spectral index. *Geoderma*. 2024. Vol. 447. P. 116935. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116935>
31. Khokhlov A., Khokhlova L. The use of vegetable bioactivated composites for cleaning oil-contaminated soils. *Ecological Sciences*. 2024. No. 5 (56). P. 189–192. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.28>
32. Dontsova T., Yanushevskaya L. Mineral-based magnetic nanocomposite sorbents. water and water purification technologies. *scientific and technical NEWS*. 2020. Vol. 26, no. 1. P. 26–35. URL: <https://doi.org/10.20535/2218-93002612020199286>
33. Khokhlov, A.V., Khokhlova, L.Y., and Titarenko, M.V. Development of Decomposing type Biosorption composites for Purification of Soil contaminated with Pesticides. *Sci. innov.* 2020. v. 16, no. 3. P. 65–76 URL: <https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/science/article/view/7579/6877>
34. ITRC. Integrated Site Characterization and Optimization / Interstate Technology & Regulatory Council. – 2024. – URL: <https://itrcweb.org/wp-content/uploads/2024/09/ISCO-2.pdf>
35. Adipah S. Remediation of Petroleum Hydrocarbons Contaminated Soil by Fenton's Oxidation. *Journal of Environmental Science and Public Health*. 2018. Vol. 02, no. 04. URL: <https://cdn.fortunejournals.com/articles/premediation-of-petroleum-hydrocarbons-contaminated-soil-by-fentonrsquos-oxidationp...pdf>
36. Chen, T. Applying ozone to accelerate remediation of petroleum-contaminated soils : dissertation for the degree of Doctor of Philosophy . – Tempe, AZ : Arizona State University, 2018. – 180 c. – URL: <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/161995247.pdf>
37. Akpoveta O. V., Medjor W. O., Medjor E. A. Fenton treatment via oxidative mechanism and its kinetics on soil polluted with automatic gas oil. *Petroleum*. 2018. Vol. 4, no. 4. P. 452–456. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.03.001>

38. Chen, Y., Chen, CM., Yoza, B.A. et al. Efficient ozonation of reverse osmosis concentrates from petroleum refinery wastewater using composite metal oxide-loaded alumina. *Pet. Sci.* 14, 605–615 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12182-017-0178-x>
39. Bykova, M.V., Alekseenko, A.V., Pashkevich, M.A. et al. Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarbon-contaminated soils of tundra, taiga, and forest steppe landscapes. *Environ Geochem Health* 43, 2331–2346 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00802-0>
40. Thermal desorption remediation effects on soil biogeochemical properties and plant performance: Global Meta-analysis / J. Liao et al. *Biogeotechnics*. 2024. P. 100140. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2024.100140>
41. A review on Microwave Assisted Thermal Remediation of Hydrocarbons Contaminated Soil: Influential Factors, Mechanism, and Prospective / Y. Zhang et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024. P. 114726. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114726>
42. Охорона ґрунтів: навч. посіб. / В. В. Дегтярьов, С. В. Крохін, Ю. В. Дегтярьов, Д. В. Гавва / за ред. д-ра с.-г. н, проф. В. В. Дегтярьова. – Харків, 2023 – 276 с – URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi80/0060256.pdf>
43. Mystrioti C, Papassiopi N. A Comprehensive Review of Remediation Strategies for Soil and Groundwater Contaminated with Explosives. *Sustainability*. 2024; 16(3):961. <https://doi.org/10.3390/su16030961>
44. Квесітадзе, Г., & Хатісашвілі, Г. (2023). Біотехнологія для очищення ґрунтів від вибухових речовин. *Science and Science of Science*, (1(119)), 47–56. <https://doi.org/10.15407/sofs2023.01.047>
45. Treatment of petroleum hydrocarbon contaminated soil by combination of electro-Fenton and biosurfactant-assisted bioslurry process / T. G. Ambaye et al. *Chemosphere*. 2023. Vol. 319. P. 138013. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138013>

46. Fang, H., Zhou, C., Guan, D.-X., Azeem, M., & Li, G. (2025). Synergistic Approaches for Sustainable Remediation of Organic Contaminated Soils: Integrating Biochar and Phytoremediation. *Agriculture*, 15(8), 905. <https://doi.org/10.3390/agriculture15080905>
47. Al-Mebayedh, H., Niu, A., & Lin, C. (2023). Strategies for cost-effective remediation of widespread oil-contaminated soils in Kuwait, an environmental legacy of the first Gulf War. *Journal of environmental management*, 344, 118601. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118601>
48. Thummarukudy M., Brown O., Moosa H. Remediation of polluted sites in the Balkans, Iraq, and Sierra Leone / Monalee Thummarukudy, Oli Brown, Hannah Moosa. – London : Earthscan (експериментальне видання в збірнику *Assessing and Restoring Natural Resources in Post-Conflict Peacebuilding* / ed. D. Jensen & S. Lonergan), 2012. – C. 135–162. – URL: <https://www.environmentalpeacebuilding.org/assets/documents/6f9e3a5e6b07.pdf>
49. Alrashed A., Alkhaledi K., Mostagab H. Assessment of hazardous soils contamination and remediation actions in Burgan oil field-Kuwait. *Journal of Engineering Research*. 2020. Vol. 8, no. 3. P. 190–202. URL: [https://doi.org/10.1016/s2307-1877\(25\)00777-1](https://doi.org/10.1016/s2307-1877(25)00777-1)
50. United Nations & World Bank. Conflict pollution hotspots in Iraq / United Nations – Іпак. – URL: <https://iraq.un.org/en/257296-conflict-pollution-hotspots-iraq-world-bank>
51. United Nations Environment Programme (UNEP). Remediation of oil contaminated sites in the conflict-affected areas: training workshop report . – Nairobi : United Nations Environment Programme, 2019. – URL: <https://www.unep.org/resources/report/remediation-oil-contaminated-sites-conflict-affected-areas-training-workshop>
52. Addressing point source soil pollution in the Western balkans: Challenges and opportunities for EU integration / C. Arias-Navarro et al. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1093/inteam/vjaf104>

53. United Nations Environment Programme (UNEP). Forms of pollution: land and soil . – Nairobi : United Nations Environment Programme, 2017. – URL: <https://www.unep.org/beatpollution/forms-pollution/land-and-soil>
54. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & United Nations Environment Programme (UNEP). Global assessment of soil pollution : report . – Rome : FAO & Nairobi : UNEP, 2021. – ISBN 978-92-5-134469-9. – URL: <https://www.unep.org/resources/report/global-assessment-soil-pollution>
55. U.S. Environmental Protection Agency. Remediation technologies for cleaning up contaminated sites . – Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency, updated October 7 2025. – URL: <https://www.epa.gov/remedytech/remediation-technologies-cleaning-contaminated-sites>
56. U.S. Environmental Protection Agency. Contaminant, media, and site type-specific remedy guidance . – Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency, published 2025. – URL: <https://www.epa.gov/superfund/contaminant-media-and-site-type-specific-remedy-guidance>
57. War-Polluted Soil: Recovery and Remediation / Bern University of Applied Sciences, School of Agricultural, Forest and Food Sciences; керівник Dr. Olena Melnyk; Royal Agricultural University (UK); Sumy National Agrarian University; Ekomonitring / SPE SKY EYE LLC. – Bern, Switzerland : Bern University of Applied Sciences, 2025–2026. – URL: <https://www.bfh.ch/en/research/research-projects/2025-326-469-503/>
58. Shevchyk L., Romaniuk O. Developing technology of remediation of oil-contaminated soils - ЛНУ “Львівська політехніка” – 2013. – URL: <https://ena.lpnu.ua/server/api/core/bitstreams/e571c150-989d-4819-b038-e67ddfd89899/content>
59. Zhylina M., Zarina L., Miroshnichenko D., Lysenko L., Karnozhytskyi P. P. Phytoremediation of war-induced heavy metal pollution in soils using humates from Ukrainian lignite / International Scientific Journals of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering “Industry-4.0” : Mechanization in agriculture &

conserving of the resources, Vol. 69 (2025), Issue 3, pp. 70-72. – 2025. – URL:
<https://stumejournals.com/journals/am/2025/3/70>

60. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Global Soil Partnership : highlights and news . – Rome : FAO, 2026. – URL:
<https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/ru/c/1732827>