

УДК 579.6:606+631/635

М. Б. Галкін, І. В. Страшнова, А. В. Андрющенко

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна,
e-mail: kgalkin@onu.edu.ua

ВИКОРИСТАННЯ МІКРООРГАНІЗМІВ У БІОРЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВНАСЛІДОК БОЙОВИХ ДІЙ

*Внаслідок бойових дій у ґрунти потрапляють речовини з вибухівки та механізмів вогнепальної зброї, паливно-мастильні матеріали і важкі метали, які несуть згубний вплив на екосистеми. У статті проаналізовано основні способи біоремедіації такого ґрунту. Використання шламових реакторів, земельної обробки, компостування, біостимуляції, біозбагачення та імобілізованих мікроорганізмів дозволяє позбутися до 99% токсичних речовин за рахунок природної або привнесеної мікробіоти. Термін очищення коливається від декількох тижнів до декількох років залежно від способу ремедіації, кліматичних умов та рівня забруднення. Перспективними є використання комбінованих методів. Очищення здійснюється за різними механізмами, які полягають у повному або частковому розщепленні речовин з трансформацією їх у нетоксичні форми (вибухівка, нафтопродукти), біоаккумуляції, біосорбції, біопреципітації та біовідновленні (важкі метали). У біоремедіації беруть участь як аеробні, так і анаеробні мікроорганізми, і найчастіше у літературі описано застосування представників таких родів як *Pseudomonas*, *Clostridium*, *Bacillus*, *Serratia*, *Stenotrophomonas*, *Arthrobacter*, *Rhodococcus*, *Cellulomonas* та інших. Необхідним є подальший пошук штамів, здатних до одночасного очищення ґрунту від декількох типів забруднювачів.*

Ключові слова: забруднення ґрунту внаслідок бойових дій, біоремедіація, аеробні та анаеробні деструктори, виведення важких металів з ґрунту.

Бойові дії несуть згубний вплив для усіх мешканців екосистем і призводять до катастрофічного погіршення стану ґрунтів, води та повітря [4, 22]. Первинний вплив полягає в наслідках обстрілів та вибухів – пожежах та вибухових хвилях, а довготривалий – у накопиченні у навколишньому середовищі токсичних викидів, важких металів, нафтопродуктів, вибухівки і продуктів згоряння [76, 86]. Окремою проблемою постає руйнування екологічно небезпечних виробництв – коксохімічних, нафтопереробних заводів та ін. [5].

Згідно з даними Державної екологічної інспекції України, площа забруднених ґрунтів внаслідок збройної агресії РФ на третю декаду 2024 року сягнула 859,3 тис. м², а площа засмічених земель – 19,8 млн. м², що склало загальні збитки на 16,5 млрд і 1,12 трлн гривень відповідно [3].

© М. Б. Галкін, І. В. Страшнова, А. В. Андрющенко, 2024



Сільськогосподарські угіддя займають близько 69% території України. Надією у відновленні ґрунтів та оздоровленні екосистем, постраждалих внаслідок бойових дій, постає застосування методів біоремедіації та відновлювального землеробства [40].

Сучасні досягнення біотехнології дозволяють відновити родючість агроценозів з використанням представників корисної мікробіоти. Мікроорганізми застосовують як агенти біодеструкції, які розщеплюють повністю або частково токсичні речовини у ґрунті, або ж трансформують їх у безпечні форми [8, 44]. Одним напрямком є створення бактеріальних біосенсорів для виявлення мін, зокрема – тринітро- та динітротолуенових на основі штамів *Escherichia coli* з репортерними генами, які забезпечують біolumінесценцію за присутності боеприпасів у ґрунті [85].

Метою даного огляду був аналіз даних літератури щодо можливостей біоремедіації ґрунтів, постраждалих від бойових дій.

До завдань літературного аналізу входили коротке викладення основних методів біоремедіації з використанням мікроорганізмів, їх порівняння та перспективи застосування в очищенні ґрунтів та відновленні їх родючості.

1. Забруднення ґрунтів внаслідок бойових дій

У районах бойових дій ґрунт забруднюється внаслідок вибухів та обстрілів. В основі вибухівки та у механізмах вогнепальної зброї використовується гексагідро-1,3,5-тринітро-1,3,5-тріазин (“Royal Demolition Explosive”, RDX), 2,4,6-тринітротолуол (TNT), октагідро-1,3,5,7-тетранітро-1,3,5,7-тетразоцин (“High Melting Explosive”, HMX), нітрогліцерин (NG), нітроцелюлоза (NC), нітрогуанідин, перхлорат, 1,3,5-тринітробензен, динітробензен, 2,4,6-тринітрофенол, 2,4-динітротолуен (DNT), N-метил-N,2,4,6-тетранітроанілін (тетрил) [40, 73]. Найбільш часто уживані – RDX та TNT, є потенційними канцерогенами, спричиняють конвульсії, хвороби печінки та анемію. Перхлорати заважають нормальному потраплянню йоду у клітини щитоподібної залози, а довготривалий вплив NG може спричинити ціаноз, галюцинації та висипи [73].

У ґрунті, забрудненому нітроароматичними сполуками, виживають мікроорганізми, найбільш пристосовані до даних умов. Змінюється видовий склад мікробіоти. Так, 26% зразків ДНК, виділених з таких ділянок, належали представникам *Acidobacteria* [26, 38]. Частка представників родини *Burkholderiaceae* у неораному ґрунті, забрудненому TNT, складала 79,7%, а у зораному ґрунті превалювали *Alcaligenaceae* – 54,7% від усіх зразків виділеної ДНК [45].

Ґрунти також забруднюються внаслідок розливу паливно-мастильних сумішей [34] та потрапляння важких металів зі зброї та використаних боеприпасів у навколишнє середовище [76, 86]. Оцінка впливу важких металів та нафтопродуктів на ріст паростків вівса у концентраціях, притаманних ґрунтам у районах бойових дій, показала найбільшу фітотоксичність саме нафтопродуктів, присутність яких не дозволяє рослинам отримувати необхідну кількість вологи [6].



Негативний вплив важких металів на ріст і розвиток рослин, зокрема – пшениці, проявляється у зменшенні маси рослин, кількості зерен у колосі та їх середній масі, що було показано у випадку цинку та купруму [7]. Підвищена концентрація цинку зменшувала кількість вологи у рослинах [6].

Важкі метали потрапляють у ґрунти, в тому числі – призначені для сільськогосподарської діяльності, внаслідок застосування артилерійської зброї [1]. Так, дослідження ґрунту Бучанського району Київської області через рік після ведення бойових дій показало підвищення концентрації важких металів (цинку, плюмбуму, хрому, нікелю, купруму, кадмію) у 3–9 разів. Причому високий рівень забруднення спостерігався не тільки у вирвах після обстрілів, а й на відстані 30 м від них внаслідок розсіювання через вибухові хвилі [1].

У ґрунтах Сумського та Охтирського району Сумської області, забруднених внаслідок падіння авіабомб та руйнації техніки, у 2022 році фонові концентрації плюмбуму була перевищена у 5,4, цинку – у 3,9, купруму – у 4,6, кадмію – у 1,4, мангану – у 4,8, кадмію – у 1,4, нікелю – у 1,2 рази [2].

Концентрація титану у вирві від снаряду перевищувала фонову у 150 разів. Також було зафіксовано появу ванадію, який у контрольних ділянках ґрунту був відсутній. На окремій ділянці було виявлено перевищення концентрації стронцію [5].

Гострою проблемою постає накопичення важких металів у рослинах. Так, на паростках вівса було показано, що за перевищення концентрації плюмбуму у ґрунті у 2–10 разів від допустимої, його вміст у рослинах збільшується на 20% – 150% відповідно [6].

2. Методи біоремедіації ґрунту, забрудненого у результаті бойових дій

В очищенні ґрунтів від вибухових речовин, паливно-мастильних матеріалів і важких металів використовують методи шламowego реактору, земельної обробки, біостимуляції, компостування та біозбагачення, включаючи варіанти з імобілізацією мікроорганізмів [16, 27, 35, 57, 67, 91]. Так, прикладом успішно проведеної біоремедіації, описаним у літературі, було очищення ґрунту збройного заводу від вибухових речовин. Для цього було застосовано два методи біоремедіації, а саме **методи шламowego реактору (“soil slurry reactor”)** і **метод земельної обробки (“land farming technique”)** [44].

2.1. Шламований реактор або реактор на основі змішаних суспензій застосовується у біоремедіації для очищення забрудненого ґрунту або відходів. У цьому методі забруднений ґрунт змішується з водою та іноді іншими добавками (поживними речовинами, сурфактантами) для створення суспензії – густої суміші. Цю суспензію потім поміщають у реактор, де вона постійно перемішується і аерується для оптимізації умов для мікроорганізмів, які розкладають забруднювачі [35, 74, 91].

Ключові характеристики шламowego реактора включають:

1. Перемішування: ґрунт і вода ретельно перемішуються, щоб забезпечити рівномірний розподіл забруднювачів і мікроорганізмів у суспензії.
2. Аерація: повітря або кисень часто вводять у реактор для стимулювання росту аеробних мікроорганізмів, які ефективно розкладають органічні забруднювачі.



3. Контроль: умови в реакторі, такі як температура, рівень рН і рівень поживних речовин, можна контролювати для оптимізації процесу біодеструкції.

Шламкові реактори особливо ефективні для обробки ґрунтів із високою концентрацією забруднювачів, які складно розкладаються у природніх умовах, або для типів ґрунтів, які важко очищати іншими методами. Їх можна використовувати для ремедіації широкого спектра органічних забруднювачів, включаючи нафтопродукти, пестициди та промислові хімікати [35, 74, 80].

2.2. Земельна обробка – це метод біоремедіації, який використовується для очищення забрудненого ґрунту шляхом підвищення природного мікробного розкладання забруднювачів. Він передбачає розподіл забрудненого ґрунту на великій, рівній поверхні (зазвичай на відкритому полі) та періодичне розпушування для аерації ґрунту та стимулювання мікробної активності [57, 80, 94].

Метод передбачає наступні етапи:

1. Підготовка ґрунту: забруднений ґрунт видобувається та транспортується на ділянку для обробки, яка часто підстиляється непроникним бар'єром, щоб запобігти проникненню забруднювачів у ґрунтові води.

2. Розподіл ґрунту: забруднений ґрунт розподіляється тонкими шарами на підготовленій поверхні. Це забезпечує краще проникнення повітря у випадку використання деструктивних аеробних процесів.

3. Розпушування або аерація: ґрунт регулярно розпушується або механічно аерується для покращення проникнення кисню, що підвищує активність аеробних мікроорганізмів.

4. Моніторинг і контроль: протягом усього процесу характеристики ґрунту, такі як вологість, рН, рівень поживних речовин і температура, контролюються та коригуються для оптимізації мікробної активності. У деяких випадках можуть бути додані поживні речовини або додаткові мікроорганізми для прискорення процесу розкладання.

5. Завершення та відновлення: після того як забруднювачі будуть розкладені на менш шкідливі речовини, оброблений ґрунт можна залишити на місці або перенести для використання на іншій ділянці [16, 23, 80].

Звичайною практикою очищення ґрунту, забрудненого вибухівкою, є використання **методів біостимуляції** та **біозбагачення**, які були застосовано, наприклад, для деструкції RDX [46] та DNT [9].

2.3. Біостимуляція – це метод біоремедіації, що передбачає покращення умов для природного росту та активності мікроорганізмів-деструкторів. Цей метод постає у додаванні певних речовин до забрудненого середовища для стимулювання природного мікробного розкладу [16, 19, 80].

Основні етапи біостимуляції:

1. Оцінка умов: перш ніж почати, оцінюють умови в забрудненому середовищі (ґрунт, вода, повітря) та визначають, які чинники обмежують діяльність мікроорганізмів (наприклад, нестача поживних речовин, низький рівень кисню).

2. Додавання поживних речовин: для стимулювання росту мікроорганізмів додають поживні речовини, які містять нітроген, фосфор або інші



елементи, в тому числі – органіку, необхідні для їхнього росту. Наприклад, для збільшення ефективності деструкції нафти методом земельної обробки у ґрунт вносили стебла бавовни [94].

3. Аерація: вводять кисень або повітря для підтримки метаболізму мікроорганізмів, якщо використовують деструктори-аероби.

4. Контроль умов: моніторинг і регулювання температури, рН та інших чинників, щоб забезпечити оптимальні умови для мікробної активності [10, 16].

Описане на початку розділу очищення ґрунту збройного заводу від вибухових речовин, присутніх у концентраціях 4000–10000 мг/кг для TNT, 800–1900 мг/кг для RDX і 600–900 мг/кг для HMX, показало більшу ефективність шламового реактору. Метод поєднували з біостимуляцією, що полягала у додаванні меляси як додаткового джерела карбону [44]. На 182-й день 99% TNT у ґрунті більше не виявлялося, причому 23% було переведено у CO₂, 24% використано для побудування клітинних структур, а решта була трансформована у низку похідних, в тому числі – 4-метил-3,5-динітроанілін, 2-метил-3,5-динітроанілін, 6-метил-5-нітробензен-1,3-діамін, жирні кислоти, а також неідентифіковані метаболіти. Деструкція RDX і HMX не виявилася настільки ефективною через складнішу структуру цих молекул. Кількість мікроорганізмів у реакторі зростала від 81 x 10² колонієутворювальних одиниць на см³ (КУО/см³) до 121 x 10⁶ КУО/см³ за 182 дні біоремедіації. Використання методу земельної обробки сприяло деструкції 82% TNT у ґрунті, і майже не змінювало вмісту RDX і HMX [44].

2.4. Компостування сприяло очищенню ґрунту від TNT, RDX та HMX до недектованого рівня впродовж 10–12 днів [27, 65, 93].

Компостування – це процес розкладання мікроорганізмами відходів і забруднювачів, змішаних з органікою. У контексті біоремедіації компостування використовується для розкладу та трансформації органічних забруднювачів, таких як нафтопродукти, пестициди та інше органічне сміття, до менш шкідливих або безпечних речовин [65]. У певному сенсі компостування відноситься до методу біостимуляції.

Етапи компостування:

1. Вибір сировини і змішування: компостування починається з вибору органічних матеріалів, які можуть включати забруднений ґрунт, сільськогосподарські відходи, харчові відходи або інші органічні матеріали. Матеріали змішуються, щоб забезпечити збалансований склад [71].

2. Процес компостування: мікроорганізми розкладають забруднювачі, перетворюючи їх у менш токсичні речовини. Формування гумусоподібного продукту може тривати кілька тижнів або місяців, залежно від умов та типу сировини.

3. Контроль: підтримується адекватний рівень вологості для підтримки мікробної активності. Температура компосту повинна сягати 55–65°C.

4. Використання: готовий компост може бути використаний як добриво або для відновлення забрудненої землі [65].

Аеробне компостування з внесенням забрудненого ґрунту (30% від суміші), 21% коров'ячого посліду, 18% деревної тирси, 18% зеленої маси люцерни, 10% картопляних відходів та 3% курячого посліду дозволило зменши-



ти концентрацію вибухівки до недектованого рівня [65, 93]. Анаеробне компостування сприяло біодеструкції 94% RDX за 26 тижнів, але даний метод був ефективним лише за середнього рівня забруднення. При цьому у суміш з ґрунтом додавали Fe(0) (0,5%) та 2% комерційного продукту «Дараменд», призначеного для покращення процесу компостування [33].

Результати очищення ґрунту від вибухівки та важких металів компостуванням представлені у літературі лише невеличкою кількістю робіт [27, 33, 79, 93], натомість даний метод частіше застосовується для біоремедіації ділянок, забруднених нафтопродуктами [52, 53, 58]. Так, внесення коров'ячого, курячого посліду та каналізаційного осаду сприяло ремедіації ґрунту від нафти на 67%, 79% та 62% відповідно протягом 35 днів [58]. Компостування з харчовими відходами сприяло деструкції 90–92% дизелю у ґрунті [53].

2.5. Біозбагачення – це метод біоремедіації, при якому у забруднене середовище додають певні штами мікроорганізмів, здатні розкласти забруднювачі [16, 64, 80].

Основні етапи біозбагачення:

1. Вибір мікроорганізмів: відбирають мікроорганізми або їх штами, які мають здатність до розкладання конкретних забруднювачів, присутніх у середовищі.

2. Підготовка і внесення: відібрані мікроорганізми у вигляді моно- або змішаних культур додають у забруднене середовище.

3. Моніторинг: контролюють їх виживання, розмноження та активність у середовищі. Перевіряють, чи мікроорганізми ефективно розкладають забруднювачі [16, 64].

2.6. Біозбагачення мікроорганізмами, імобілізованими на носіях

Імобілізація мікроорганізмів полягає у прикріпленні або фіксації мікроорганізмів на твердих або гелевих носіях. Цей підхід дозволяє підвищити ефективність розкладу забруднювачів, зокрема в складних екологічних умовах, де мікроорганізми, що вільно існують, можуть мати обмежену активність або виживаність [67, 72, 81].

Етапи імобілізації мікроорганізмів:

1. Вибір мікроорганізмів і носія: мікроорганізми підбираються відповідно до типу забруднювача. Носії включають глини, пісок, целюлозу, деревну тирсу, вулканічний камінь або інші природні матеріали. Штучні носії включають синтетичні полімери, активоване вугілля, біопластики або інші матеріали, які можуть бути спеціально створені для забезпечення кращого прикріплення мікроорганізмів та підтримки їх активності [49, 97].

2. Методи імобілізації:

- Адсорбція: мікроорганізми природним чином прикріплюються до поверхні носія за рахунок фізико-хімічних взаємодій, таких як гідрофобні зв'язки або електростатичні сили [72].

- Коагуляція і флокуляція: використовуються хімічні речовини, які викликають агрегацію мікроорганізмів і їх прикріплення до носія.

- Інкапсуляція: мікроорганізми захоплюються всередині матриці (наприклад, у гелі, альгінаті або полімері), що утримує їх на місці та захищає від несприятливих умов середовища.



- Ковалентне зв'язування: мікроорганізми хімічно зв'язуються з носієм через ковалентні зв'язки, що забезпечує їх стійке прикріплення.

3. Внесення у середовище, яке потребує очищення: іммобілізовані мікроорганізми легко вводяться в системи очищення ґрунту, і їх легше контролювати порівняно з культурами, що вільно існують [97].

Іммобілізовані мікроорганізми краще витримують несприятливі умови навколишнього середовища, такі як зміни температури, рН або наявність токсичних речовин, і підтримують високу метаболічну активність мікроорганізмів протягом тривалого часу [59, 67, 78]. Так, бактерії *Arthrobacter subterraneus*, іммобілізовані на частках біовугілля, виживали до 6 місяців і здійснювали біодеструкцію 85,98% RDX і 80,4% НМХ у забрудненому ґрунті за 30 днів [84].

Якщо порівнювати вищезазначені методи, можна зауважити, що біостимуляція шляхом додавання поживних речовин або джерел карбону показувала високу ефективність у поєднанні з іншими методами, такими як шламаний реактор або земельна обробка [44]. Компостування є ефективним підходом для швидкого очищення ґрунту від органічних забруднювачів і вибухових речовин, але може бути менш ефективним для важких металів та інших неорганічних забруднювачів [52, 58]. Метод шламаний реактору можна рекомендувати для ґрунтів із високою концентрацією забруднювачів, що важко розкладаються у природних умовах [35, 74]. Метод земельної обробки краще підходить для очищення від легко розкладних органічних речовин і підвищує ефективність мікробної активності завдяки природній аерації [94]. Біозбагачення з іммобілізацією мікроорганізмів дозволяє значно підвищити ефективність біоремедіації завдяки введенню спеціально відібраних штамів мікроорганізмів [67, 72, 84]. Для очищення певних ділянок ґрунту доцільним може бути поєднання декількох вищезазначених методів.

3. Мікроорганізми, здатні до деструкції вибухових речовин

Мікроорганізми здатні виживати у забруднених ґрунтах і пристосовуватися до деструкції вибухових речовин. Так, серед бактерій в анаеробних умовах повну або часткову біодеградацію TNT здійснюють *Clostridium* sp. [12] і *Desulfovibrio* sp. [31], *Escherichia coli*, *Methanococcus* sp., *Veillonella alcalescens* [82, 83].

За аеробних умов цей процес відбувається за участю *Bacillus* sp., *Enterobacter* sp., *Mycobacterium* sp., *Pseudomonas* sp., *Rhodococcus erythropolis*, *Stenotrophomonas maltophilia*, *Methylobacterium* sp., *Serratia marcescens*, *Sporolactobacillus kafiensis* [83], *Serratia plymuthica* [31]. Так, дослідниками було показано зменшення концентрації TNT в лабораторних умовах на 46% і 59% за внесення культури *Pseudomonas aeruginosa* і первинних концентрацій забруднювача 50 мг/л і 75 мг/л [60].

Мінералізувати і трансформувати TNT здатні також деякі базидіо- та мікроміцети, наприклад, *Trametes modesta*, *Agrocybe praecox*, *Alternaria* sp., *Aspergillus terreus*, *Mucor mucedo*, *Penicillium* sp. [44, 68, 73].

Біодеградація RDX краще відбувається за анаеробних умов або умов зменшеної концентрації кисню, і може здійснюватися такими бактеріями,



як *Clostridium bifermentans*, *Morganella morganii*, *S. marcescens*, *Prevotella ruminicola*, *Anaerovibrio lipolyticus* [21, 32, 39, 46, 73]. Консорціум, що складався переважно з представників родів *Sporolactobacillus*, *Clostridium*, *Paenibacillus*, *Pseudomonas* успішно здійснювали біодеградацію RDX за додавання у середовище крохмалю в концентрації 2,5 г/л з високою швидкістю деградації 0,015 мМ на день [46]. Крохмаль додається не тільки для покращення росту певних груп мікроорганізмів, але й для підсилення відновлювального потенціалу середовища для здійснення нітрат-редукції [46].

За аеробних умов біодеградацію RDX здійснюють представники *Actinobacteria*, і вперше цю властивість було описано для *Corynebacterium* [73]. Нещодавно дослідниками було показано, що представники роду *Actinomyces*, виділені з ділянок, забруднених вибуховими речовинами, здатні здійснювати біодеструкцію не тільки RDX, а й TNT [41].

Біодеградація NG відбувається за аеробних і анаеробних умов, і краще – за присутності джерела карбону. До такого процесу здатні багато бактерій – представників родів *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Agrobacterium*, *Rhodococcus*, *Klebsiella*, а також мікроміцети [55, 73, 90].

Здатність до деградації перхлоратів відома для бактерій роду *Citrobacter* [69].

Біодеградацію TNT і RDX було показано для штамів мікроміцетів *Phanerochaete chrysosporium*, виділених з ґрунту військового полігону. Серед бактерій потенційними агентами біоремедіації, виділеними з цих ділянок, були *Bacillus sp.* (в тому числі – *B. subtilis*), *Escherichia coli*, *Enterobacter sp.*, *Klebsiella pneumonia* [70].

Було показано посилення трансформації DNT природними консорціумами мікроорганізмів на 82% за внесення комерційних сполук сульфуру та фосфору. При цьому у природних популяціях збільшувалася частка представників родів *Burkholderia*, *Rhodanobacter*, *Acidovorax*, *Pseudomonas*, завдяки яким більшою мірою й здійснювався біоремедіаційний процес [9].

Штам *Planomicrobium flavidum*, виділений з ґрунтів, забруднених вибухівкою, розкладав 70% НМХ за 20 днів [66].

Незважаючи на досліджений потенціал багатьох мікроорганізмів, саме бактерії роду *Pseudomonas* є найбільш широко представленими як агенти біодеструкції вибухових речовин – ймовірно, за рахунок нескладних умов культивування даних мікроорганізмів, а також їх пристосованості до багатьох умов навколишнього середовища [26, 55]. Для успішної ремедіації забруднених ґрунтів має бути дослідженим потенціал інших мікроорганізмів з наголосом на використання консорціумів.

4. Мікроорганізми, здатні до деструкції паливно-мастильних матеріалів

Ґрунт авіабази у Польщі, забруднений керосином та важкими фракціями дизельного палива, було успішно очищено у шламових реакторах з використанням природної мікробіоти даних ґрунтових ділянок. Було звільнено 90% ґрунту від домішок палива за декілька місяців [48].



Порівняння результатів біостимуляції з додаванням азотних, калійних та фосфорних добрив, та природного очищення у ґрунті ділянок військових полігонів, розташованих в Альпах, Південний Тіроль, Італія, показало більш ефективне очищення від паливно-мастильних матеріалів за внесення добрив і підвищення температури до 20 °С [87]. Під час біоремедіації спостерігалися зміни у природній популяції мікроорганізмів. Так, разом з тим, як вміст палива у ґрунті зменшувався, склад мікробіоти ставав усе більше гомогенним. При цьому збільшувалися частки представників *Gammaproteobacteria* та *Bacteroidetes*, серед них найбільшою мірою – *Pseudomonas* sp. [25, 29, 87] як типовий приклад так званого «гама-шифту», який спостерігається на субстратах, забруднених нафтою та похідними паливними матеріалами [30, 87]. Крім псевдомонад, у даному дослідженні превалювали такі представники *Gammaproteobacteria*, як *Lysobacter*, *Poalibacter*, *Solimonas*, *Pseudoxanthomonas*, та представники *Bacteroidetes* – *Mangrovibacterium*, *Paludibacter*, *Petrimonas*, *Mariniphaga* [87].

У забруднених паливом ґрунтах було відмічено дуже низьку кількість архей порівняно з неконтамінованими [87]. Представники *Archae* (*Methanosaeta*, *Methanoculleus*, *Methanolinea*), які можуть складати 45–50% видового складу метаногенних співтовариств у субстратах з великим вмістом гексадеканів та октадеканів, відіграють суттєву роль в очищенні ґрунту від нафти лише за анаеробних умов [36].

Також за анаеробних умов найактивнішими деструкторами нафти і похідних сполук виступали представники роду *Clostridium*, які складали 30,4% від видового складу мікробних популяцій на субстратах з нафтою, 42–43% на субстратах з гексадеканами і октадеканами, 52,1% – за наявності пальмітату, і 60,4% – на субстратах, забруднених стеаратами [36].

Біоремедіація ґрунту військового полігону північної Гренландії, забрудненого дизелем, показала, що у холодному кліматі було можливим позбавитися 64% дизелю за перший рік експерименту методом земельної обробки та біостимуляції азотними, калійними та фосфорними добривами з домішками мікроелементів. При цьому популяція мікроорганізмів-деструкторів збільшувалася до $1,2 \times 10^9$ КУО/г ґрунту. Залишалися у ґрунті ще протягом 5 років 18% стійких фракцій дизелю [42].

У ґрунтах, забруднених дизелем, підтримуються значні популяції ліполітичних та фосфат-солубілізуювальних бактерій, як це було показано для ділянок у Мексиці. Загальна кількість мікроорганізмів у забруднених ґрунтах на 24–58% була нижчою за таку на контрольних ділянках, але серед них виділялися активні деструктори дизелю – такі як *S. marcescens*, *Citrobacter freundii*, *Raoultella ornithinolytica*, *Stenotrophomonas maltophilia*, *Stenotrophomonas ravanii*, виділені дослідниками та відібрані за здатністю до продукування сурфактантів та відповідного емульгування дизелю з наступною його деструкцією. Найкращі показники демонстрував штаб *S. marcescens*, рівень емульгування дизелю яким складав 74,2%, що сприяло деструкції 96% палива. Консорціум з шести штамів вищезгаданих видів здійснював біодеградацію 97% дизелю [62].



За деструкцію нафти у піщаному ґрунті були відповідальні *Nocardioides*, *Dietzia* (особливо *D. papillomatosis*), *Microbacterium*, *Micrococcus*, *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, *Cellulomonas*, *Gordonia* [15]. Бактерії штаму *Burkholderia cepacia*, виділені з контамінованого ґрунту, були здатними до деструкції 80% нафтових вуглеводнів [13].

Представники роду *Bacillus* були здатними до ефективної деструкції дизелю – *B. subtilis* [29, 43] та нафти – *Bacillus cereus*, *Bacillus licheniformis* [25, 37].

5. Мікроорганізми, здатні до біоремедіації ґрунтів, забруднених важкими металами

Біоремедіація ґрунтів, забруднених важкими металами, базується на здатності деяких мікроорганізмів поглинати, осаджувати чи відновлювати важкі метали, що дозволяє знижувати їх концентрацію в ґрунті до безпечного рівня. Основні механізми біоремедіації включають **біоаккумуляцію**, **біосорбцію**, **біопреципітацію** та **біовідновлення** [8, 11, 56, 79].

За процесу **біоаккумуляції** мікроорганізми поглинають важкі метали з ґрунту та накопичують їх всередині своїх клітин. Наприклад, бактерії роду *Bacillus* – а саме, представники видів *B. cereus*, *B. megaterium*, *B. coagulans*, *B. aryabhattai* здатні поглинати кадмій, плумбум, цинк, арсен, хром [20, 63, 88, 95]. *B. licheniformis* активно акумулювали купрум [11].

Бактерії *P. aeruginosa* і *Cupriavidus taiwanensis*, виділені з цинкових шахт, здійснювали біоаккумуляцію кадмію та цинку [51]. *Exiguobacterium* sp. були здатними до сорбції та акумуляції кадмію, нікелю, купруму та цинку [14].

Процес **біосорбції** відбувається завдяки тому, що метали зв'язуються з клітинними стінками або зовнішніми полімерами мікроорганізмів, що зменшує їхню рухливість і токсичність у ґрунті. Наприклад, *B. thuringiensis*, *B. cereus* здатні адсорбувати кадмій, нікель, хром, купрум, плумбум, цинк, гідраргірум [17, 89, 95]. *B. pumilis* і *B. subtilis*, стійкі до підвищених концентрацій купруму, здійснювали біосорбцію Cu^{2+} [28].

Описано здатність до сорбції Cr(VI) у штаму *Shewanella putrefaciens* [77]. Бактерії штаму *Pseudodescherichia vulneris*, виділеного із забрудненого кадмієм ґрунту і надзвичайно стійкі до впливу цього металу, були здатними до сорбції 71% кадмію [92].

Біосорбцію 71% плумбуму було здійснено консорціумом штамів *Pseudomonas stutzeri* та *Cupriavidus metallidurans* [75].

Біопреципітація полягає в тому, що деякі мікроорганізми можуть перетворювати розчинні йони важких металів у нерозчинні форми, які осаджуються і залишаються в ґрунті в стабільному стані. Наприклад, окремі штами *B. thuringiensis* здатні преципітувати плумбум у фосфат плумбуму $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ [24]. Штам *Rahnella* sp. здійснював преципітацію купруму у присутності кальцію у мінеральну фосфатну форму $\text{CuCa}_{10}(\text{PO}_4)_7$, а плумбум у присутності кальцію – у фосфати $\text{Pb}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ і $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ [50].

Sporosarcina pasteurii, відомі за здатністю преципітувати Ca^{2+} у CaCO_3 , можуть також іммобілізувати важкі метали, наприклад, цинк, кадмій і плум-



бум, здійснюючи їх преципітацію у відповідні карбонати, внаслідок чого концентрація металів у ґрунті зменшується на 30–86% [54].

Сульфатвідновлювальні бактерії, використовуючи сульфатну групу SO_4^{2-} як акцептор електронів, відновлюють її до сульфідної S^{2-} , яка у свою чергу може утворювати нерозчинні сульфіди, такі як PbS або SbS [56, 96].

Процес біовідновлення відбувається за рахунок того, що мікроорганізми відновлюють токсичні йони металів до менш токсичних або навіть нетоксичних форм. Наприклад, можуть відновлювати шестивалентний хром Cr(VI) до тривалентного хрому Cr(III), який є менш токсичним і менш рухливим у ґрунті. Наприклад, *Bacillus* sp. у консорціумі з *Microbacterium* sp. активно здійснювали цей процес за аеробних умов, а за анаеробних умов відновлення відбувалося штамми видів *Enterococcus*, *Arthrobacter*, *Paenibacillus* та *Oceanobacillus* [61, 95].

Відновлення купруму з Cu^{2+} до Cu^+ здійснювалося штамом *Pseudomonas* sp., виділеним з ґрунту, забрудненого міддю [18].

Штами *Geothrix*, *Azospira* і *Cellulomonas* були здатними відновлювати Cu^{2+} до металічного купруму $\text{Cu}(0)$, а в присутності біогенного сульфідіду – до Cu_xS , і ці сполуки утворювали наночастки, які потім преципітувалися бактеріальними клітинами [47].

Деяким мікроорганізмам, наприклад, бактеріям роду *Bacillus* притаманна здатність до декількох процесів – біоаккумуляції, біосорбції та біопреципітації [95].

Таким чином, біоремедіацію ґрунтів, забруднених внаслідок бойових дій, здійснюють з використанням шламових реакторів, земельної обробки і компостування, до яких залучають допоміжні методи біостимуляції, біозбагачення та іммобілізації мікроорганізмів. Перспективними є дослідження можливостей використання комбінованих методів, які можуть значно підвищити ефективність біоремедіації, забезпечуючи кращі умови для мікробної активності. Очищення ґрунту від вибухівки, паливно-мастильних матеріалів та важких металів відбувається як за аеробних, так і анаеробних умов з використанням природної або штучно внесеної мікробіоти. Найчастіше використовують представників родів *Pseudomonas*, *Clostridium*, *Bacillus*, *Serratia*, *Stenotrophomonas*, *Arthrobacter*, *Rhodococcus*, *Cellulomonas* та інших. Необхідним є подальший пошук штамів, здатних до одночасного очищення ґрунту від декількох типів забруднювачів.



M. B. Galkin, I. V. Strashnova, A. V. Andryushchenko

Odesa I. I. Mechnikov National University,
2 Dvorianska St, Odesa, 65082, Ukraine
e-mail: kgalkin@onu.edu.ua

USE OF MICROORGANISMS IN BIOREMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED AS A RESULT OF MILITARY ACTIONS

Summary

*As a result of military activities, soils are contaminated with substances from explosives and firearm mechanisms, fuel, lubricants, and heavy metals, all of which have detrimental effects on ecosystems. This article analyzes the main methods of bioremediation for such contaminated soil. The use of soil slurry reactors, land farming technique, composting, biostimulation, bioaugmentation, and immobilized microorganisms can eliminate up to 99% of toxic substances through natural or introduced microbiota. The duration of the cleanup process ranges from several weeks to several years, depending on the remediation method, climatic conditions, and the level of contamination. The use of combined methods is promising. The remediation is achieved through various mechanisms, including the complete or partial breakdown of substances with their transformation into non-toxic forms (explosives, petroleum products), bioaccumulation, biosorption, bioprecipitation, and bioreduction (heavy metals). Both aerobic and anaerobic microorganisms participate in bioremediation, with representatives from the genera *Pseudomonas*, *Clostridium*, *Bacillus*, *Serratia*, *Stenotrophomonas*, *Arthrobacter*, *Rhodococcus*, *Cellulomonas* and others most frequently described in the literature. Further search for strains capable of simultaneously cleaning the soil from multiple types of pollutants is necessary.*

Key words: contamination of soil due to military actions, bioremediation, aerobic and anaerobic decomposers, removal of heavy metals from soil.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дмитренко О.В., Дем'янюк О.С., Погоріла Л.П., Свидинюк Н.Л., Рожжа В.В., Кирилюк П.М., Романенко В.М. Екотоксикологічна оцінка дерново-підзолистого ґрунту за впливу бойових дій // Агроекологічний журнал. – 2023. – № 4. – С. 89–96. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293758>
2. Зайцев Ю.О., Грищенко О.М., Романова С.А., Зайцева І.О. Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського районів Сумської області // Агроекологічний журнал. – 2022. – № 3. – С. 136–149. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>
3. Збитки довкіллю внаслідок збройної агресії РФ: актуальна інформація. Сайт Державної екологічної інспекції України <https://www.dei.gov.ua/> (дата звернення 12.08.2024)
4. Кузик А.Д., Товарянський В.І. Вплив воєнних дій на лісові системи України та їх післявоєнне відновлення // Вісник Львівського державного уні-



- верситету безпеки життєдіяльності. – 2023. – № 27. – С. 16–22. <https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.02>
5. Лісова Н. Вплив військових дій в Україні на екологічний стан території // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія. – 2017. – № 2. – С. 165–173.
 6. Писаренко П.В., Самойлік М.С., Галицька М.А., Диченко О.Ю., Тараненко С.В. Дослідження впливу техногенного забруднення внаслідок воєнних дій на показники ґрунту агроценозів // Аграрні інновації. – 2022. – № 14. – С. 94–102. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.14.14>
 7. Шумигай І.В., Коніщук В.В., Мороз В.В., Манішевська Н.М. Біогеохімічна, фізіологічна адаптивність пшениці озимої (*Triticum L.*) за впливу важких металів у лісостепу України // Агроекологічний журнал. – 2023. – № 1. – С. 101–109. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2023.276734>
 8. Abo-Alkasem M.I., Hassan N.H., Abo Elsoud M.M. Microbial bioremediation as a tool for the removal of heavy metals // Bull. Natl. Res. Cent. – 2023. – 47, 31: <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01006-z>
 9. Aburto-Medina A., Shahsavari E., Taha M., Bates A., Van Ieperen L., Ball A.S. The impacts of different biological treatments on the transformation of explosives waste contaminated sludge // Molecules. – 2021. – 16:4814: doi: 10.3390/molecules26164814.
 10. Adams G.O., Fufeyin P.T., Okoro S.E., Ehinomen I. Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review // Int. J. Environ. Bioremed. Biodegrad. – 2015. – 3, № 1. – P. 28–39. DOI:10.12691/ijebb-3-1-5
 11. Ahmad F., Hughes J. B. Anaerobic transformation of TNT by *Clostridium* // In: Spain J. C., Hughes J. B., Knackmuss H.-J. (Eds.) Biodegradation of Nitro Aromatic Compounds and Explosives. – Boca Raton, FL: Lewis, 2000. – P. 185–212. DOI:10.1201/9781420032673.ch8
 12. Ajeel N.S., Mohammed A.J. Bioremediation of contaminated soil with hydrocarbons discharged from liquid petroleum gas filling refineries by *Burkholderia cepatia* // International Journal of Health Sciences. – 2022. – 6(S9): P. 1084–1093. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS9.12417>.
 13. Aderonke K.A., Oladimeji O.O., Shittu O.B., Okeyode I.C., Taiwo M.O. Bioaccumulation of heavy metals using selected organisms isolated from electronic waste dumpsite of two south-western states in Nigeria // Appl. Environ. Res. – 2017. – 39(2). – P. 29–40. <https://doi.org/10.35762/AER.2017.39.2.3>
 14. Alam M.Z., Ahmad S. Multi-metal biosorption and bioaccumulation by *Exiguobacterium* sp. ZM-2 // Ann. Microbiol. – 2013. – 63. – P. 1137–1146. <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0571-z>
 15. Ali N., Dashti N., Khanafar M., Al-Awadhi H., Radwan S. Bioremediation of soils saturated with spilled crude oil // Sci. Rep. – 2020. – 10: P. 1116. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57224-x>.
 16. Alori E.T., Gabasawa A.I., Elenwo C.E., Agbeyegbe O.O. Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment // Front. Soil



- Sci. – 2022. – 2:937186. DOI: 10.3389/fsoil.2022.937186
17. *Altowayti W.A.H., Algaiifi H.A., Bakar S.A., Shahir S.* The adsorptive removal of As (III) using biomass of arsenic resistant *Bacillus thuringiensis* strain WS3: characteristics and modelling studies // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* – 2019. – 172. – P. 176–185. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.067
 18. *Andreazza R., Pieniz S., Wolf L., Lee M.K., Camargo F.A.O., Okeke B.C.* Characterization of copper bioreduction and biosorption by a highly copper resistant bacterium isolated from copper-contaminated vineyard soil // *Science of The Total Environment.* – 2010. – 408(7). – P. 1501–1507. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.12.017
 19. *Anekwe I.M.S., Isa Y.M.* Application of biostimulation and bioventing system as bioremediation strategy for the treatment of crude oil contaminated soils // *Soil Water Res.* – 2024. – 19, № 2. – P. 100–110. DOI: 10.17221/66/2023-SWR
 20. *Belapurkar P., Goyal P., Kar A.* In vitro evaluation of bioremediation capacity of a commercial probiotic, *Bacillus coagulans*, for chromium (VI) and lead (II) toxicity // *J. Pharm. Bioallied Sci.* – 2016. – 8. – P. 272–276. doi: 10.4103/0975-7406.199344
 21. *Bhushan B., Halasz A., Thiboutot S., Ampleman G., Hawari J.* Chemotaxis-mediated biodegradation of cyclic nitramine explosives RDX, HMX, and CL-20 by *Clostridium* sp. EDB2 // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* – 2004. – 316, № 3. – P. 816–821. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2004.02.120>
 22. *Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F.* Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review // *Sustainability.* – 2020. – 12, № 21. – P. 9002: <https://doi.org/10.3390/su12219002>
 23. *Brown D. M., Okoro S., van Gils J., van Spanning R., Bonte M., Hutchings T., Linden O., Egbuche U., Bruun K.B., Smith J.W.N.* Comparison of landfarming amendments to improve bioremediation of petroleum hydrocarbons in Niger Delta soils // *Sci. Total Environ.* – 2017. – V. 596–597. – P. 284–292. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.072
 24. *Chen Z., Pan X., Chen H., Lin Z., Guan X.* Investigation of lead (II) uptake by *Bacillus thuringiensis* 016 // *World J. Microbiol. Biotechnol.* – 2015. – 31. – P. 1729–1736. doi: 10.1007/s11274-015-1923-1
 25. *Chonoko U.G., Abdullahi I.O., Ado S.A., Whong C.M.Z.* Hydrocarbon degradation by autochthonous species of *Bacillus cereus* and *Pseudomonas aeruginosa* isolated from Kaduna refinery effluents // *Cont. J. Biol. Sci.* – 2017. – 10(2): P. 10–26. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.839052>
 26. *Corredor D., Duchicela J., Flores F. J., Maya M., Guerron E.* Review of explosive contamination and bioremediation: insights from microbial and bio-omic approaches // *Toxics.* – 2024. – 12. – P. 249: <https://doi.org/10.3390/toxics12040249>
 27. *Craig H., Sisk W., Nelson M., Dana W.* Bioremediation of explosives-contaminated soils: a status review // *In Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research, Manhattan, KS, USA, 23–24 May 1995.* – P. 164.



28. *Danial A.W., Dardir F.M.* Copper biosorption by *Bacillus pumilus* OQ931870 and *Bacillus subtilis* OQ931871 isolated from Wadi Nakheil, Red Sea, Egypt // *Microb. Cell Fact.* – 2023. – 22. – P. 152: doi: 10.1186/s12934-023-02166-3.
29. *Das K., Mukherjee A.K.* Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from North-East India // *Bioresour. Technol.* – 2007. – 98(7): P. 1339–1345. doi: 10.1016/j.biortech.2006.05.032
30. *Dong Y., Lang Z., Kong X., Lu D., Liu Z.* Kinetic and multidimensional profiling of accelerated degradation of oil sludge by biostimulation // *Environ. Sci. Process Impact.* – 2015. – 17. – P. 763–774. <https://doi.org/10.1039/c4em00428k>.
31. *Drzyzga O., Bruns-Nagel D., Gorontzy T., Blotevogel K.-H., Gemsa D.* Mass balance studies with ¹⁴C-labeled 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) mediated by an anaerobic *Desulfovibrio* species and an aerobic *Serratia* species // *Curr. Microbiol.* – 1998. – 37. – P. 380–386. doi: 10.1007/s002849900397
32. *Eaton H.L., Durringer J.M., Murty L.D., Craig A.M.* Anaerobic bioremediation of RDX by ovine whole rumen fluid and pure culture isolates // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* – 2013. – 97. – P. 3699–3710. doi: 10.1007/s00253-012-4172-3
33. *Elgh-Dalgren K., Waara S., Duker A., von Kronhelm T., van Hees P.* Anaerobic bioremediation of a soil with mixed contaminants: explosives degradation and influence on heavy metal distribution, monitored as changes in concentration and toxicity // *Water Air Soil Pollut.* – 2009. – 202. – P. 301 – 313. DOI: 10.1007/s11270-009-9977-z
34. *Fernandez-Lopez C., Posada-Baquero R., Ortega-Calvo J.-J.* Nature-based approaches to reducing the environmental risk of organic contaminants resulting from military activities // *Science of The Total Environment.* – 2022. – 843: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157007>.
35. *Forján R., Lores I., Sierra C., Baragaño D., Gallego J.L.R., Peláez A.I.* Bioaugmentation treatment of a PAH-polluted soil in a slurry bioreactor // *Appl. Sci.* – 2020. – 10, № 8. – P. 2837: <https://doi.org/10.3390/app10082837>
36. *Fowler S.J., Toth C.R.A., Gieg L.M.* Community structure in methanogenic enrichments provides insight into syntrophic interactions in hydrocarbon-impacted environments // *Front. Microbiol.* – 2016. – 7: P. 562. doi: 10.3389/fmicb.2016.00562.
37. *García-Alcántara J.A., Maqueda-Gálvez A.P., Téllez-Jurado A., Hernández-Martínez R., Lizardi-Jiménez M.A.* Maya crude-oil degradation by a *Bacillus licheniformis* consortium isolated from a Mexican thermal source using a bubble column bioreactor // *Water Air Soil Pollut.* – 2016. – 227: P. 413. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3121-7>
38. *Habineza A., Zhai J., Mai T., Mmereki D., Ntakirutimana T.* Biodegradation of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) in contaminated soil and microbial remediation options for treatment // *Period. Polytech. Chem. Eng.* – 2017. – 61. – P. 171–187. <https://doi.org/10.3311/PPch.9251>



39. *Hawari, A., Halasz, T., Sheremata T., et al.* Characterization of metabolites during biodegradation of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) with municipal anaerobic sludge // *Appl. Environ. Microbiol.* – 2000. – 66, № 6. – P. 2652–2657. doi: 10.1128/aem.66.6.2652-2657.2000
40. *Hryhorczuk D., Levy B.S., Prodanchuk M., Kravchuk O., Bubalo N., Hryhorczuk A., Erickson T.B.* The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine // *J. Occup. Med. Toxicol.* – 2024. – 19, 1: <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>
41. *Jaafaryneya M., Amani J., Halabian R.* Biodegradation of 2,4,6-trinitrotoluene and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine by *Actinomycetes* species, first time isolated and characterized from water, wastewater, and sludge // *Water Environ. J.* – 2023. – 37, № 3. – P. 538–548. <https://doi.org/10.1111/wej.12857>
42. *Johnsen A.R., Boe U.S., Henriksen P., Malmquist L.M.V., Christensen J.H.* Full-scale bioremediation of diesel-polluted soil in an Arctic landfarm // *Environmental Pollution.* – 2021. – 280: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116946>.
43. *Kaida N., Habib S., Yasid N.A., Shukor M.Y.A.* Biodegradation of petroleum hydrocarbons by *Bacillus spp.*: a review // *Bioremediation Sci. Technol. Res.* – 2018. – 6(2): P. 14–21. <https://doi.org/10.54987/bstr.v6i2.433>.
44. *Kalderis D., Juhasz A. L., Boopathy R., Comfort S.* Soils contaminated with explosives: environmental fate and evaluation of state-of-the-art remediation processes (IUPAC technical report) // *Pure Appl. Chem.* – 2011. – 83, № 7. – P. 1407–1484. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-10-01-05>.
45. *Keshani-Langroodi S., Lan Y., Stenuit B., Rosen G., Hughes J.B., Sales C.M.* Uncovering the structure and function of microbial communities formed during periodic tilling of TNT and DNT co-contaminated soils // *bioRxiv.* – 2020: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.12.12.420737v1>
46. *Khan M.I., Yoo K., Kim S., Cheema S.A., Bashir S., Park J.* A *Sporolactobacillus*-, *Clostridium*-, and *Paenibacillus*-dominant microbial consortium improved anaerobic RDX detoxification by starch addition // *J. Microbiol. Biotechnol.* – 2020. – 30, № 6. – P. 839–847. doi: 10.4014/jmb.1910.10034
47. *Kimber R.L., Elizondo G., Jedyka K., Boothman C., Cai R., Bagshaw H., et al.* Copper bioreduction and nanoparticle synthesis by an enrichment culture from a former copper mine // *Environ. Microbiol.* – 2023. – 25(12). – P. 3139–3150. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.16488>
48. *Kolwzan B., Grabas K., Pawelczyk A.* Bioremediation of military area contaminated by petroleum products // *Geotechnics of Waste Management and Remediation (GeoCongress): Proc. Conf.* – 2012: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40970%28309%2963>
49. *Li D.S., Feng J.Q., Liu Y.F., Zhou L., Liu J.F., Gu J.D., Mu B.Z., Yang S.Z.* Enrichment and immobilization of oil-degrading microbial consortium on different sorbents for bioremediation testing under simulated aquatic and soil conditions // *Appl. Environ. Biotechnol.* – 2019. – 5, № 1. – P. 1–11: <https://www.udspub.com/ajj/public/index.php/aeb/article/view/509>



50. *Li M., Liu S., Wang Y., Do H., Zhao C.* Effect of coexisting metal ions on bio-precipitation of Cu^{2+} phosphate by *Rahnella* sp. LRP3 and its stability in soil // *Plant Soil Environ.* – 2021. – 67(12). – P. 729–738. <https://doi.org/10.17221/279/2021-PSE>
51. *Limcharoensuk T., Sooksawat N., Sumarnrote A., Awutpet T., Kruatrachue M., Pokethitiyook P., Auesukaree C.* Bioaccumulation and biosorption of Cd^{2+} and Zn^{2+} by bacteria isolated from a zinc mine in Thailand // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* – 2015. – 122. – P. 322–330. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.08.013
52. *Lin C., Cheruiyot N.K., Bui X.T., Ngo H.H.* Composting and its application in bioremediation of organic contaminants // *Bioengineered.* – 2022. – 13(1). – P. 1073–1089. doi: 10.1080/21655979.2021.2017624
53. *Lin C., Sheu D.-S., Lin T.-C., Cao C.M., Grasso D.* Thermophilic biodegradation of diesel oil in food waste composting processes without bioaugmentation // *Environ Eng Sci.* – 2012. – 29(2). – P. 117–123. <https://doi.org/10.1089/ees.2010.0212>
54. *Liu P., Zhang Y., Tang Q., Shi S.* Bioremediation of metal-contaminated soils by microbially-induced carbonate precipitation and its effects on ecotoxicity and long-term stability // *Biochem. Eng. J.* – 2021. – 166: 10.1016/j.bej.2020.107856.
55. *Lorenz A., Rylott E.L., Strand S.E., Bruce N.C.* Towards engineering degradation of the explosive pollutant hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine in the rhizosphere // *FEMS Microbiol. Lett.* – 2013. – 340. – P. 49–54. doi: 10.1111/1574-6968.12072
56. *Ly Y., Zhu X., Zhang M., Liu X., Wang J.* In-situ bioremediation of multiple heavy metals contaminated farmland soil by sulfate-reducing bacteria // *Polish J. Environ. Stud.* – 2022. – 31(2). – P. 1747–1755. <https://doi.org/10.15244/pjoes/141326>
57. *Mambwe M., Kalebaila K.K., Johnson T.* Photochemical oxidation and land-farming as remediation techniques for oil-contaminated soil // *GJESM.* – 2024. – 10, № 2. – P. 517–536. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.02.07>
58. *Marwa A.* Influence of organic waste on bioremediation of oil-contaminated soil // *Ecological Engineering & Environmental Technology.* – 2024. – 25(5). – P. 32–41. <https://doi.org/10.12912/27197050/184238>
59. *Mehrotra T., Dev S., Banerjee A., Chatterjee A., Singh R., Aggarwal S.* Use of immobilized bacteria for environmental bioremediation: a review // *J. Environ. Chem. Eng.* – 2021. – 9, № 5: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105920>
60. *Mercimek H. A., Dincer S., Guzeldag G., Ozsavli A., Matyar F., Arkut A., Kayis F., Sumengen Ozdenefe M.* Degradation of 2,4,6-trinitrotoluene by *P. aeruginosa* and characterization of some metabolites // *Braz. J. Microbiol.* – 2015. – 46, № 1. – P. 103–111. doi: 10.1590/S1517-838246120140026
61. *Molokwane P.E., Meli C.K., Chirwa E.M.N.* Chromium (VI) reduction in activated sludge bacteria exposed to high chromium loading // *Water Sci. Technol.* – 2008. – 58(2). – P. 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.07.040>
62. *Morales-Guzman G., Ferrera-Cerrato R., Rivera-Cruz M.C., Torres-Bustillos L.G., Arteaga-Garibay R.I., Mendoza-Lopez M.R., Esquivel-Cote R.,*



- Alarcon A.* Diesel degradation by emulsifying bacteria isolated from soils polluted with weathered petroleum hydrocarbons // *Appl. Soil Ecol.* – 2017. – 121. – P. 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.003>
63. *Murthy S., Geetha B., Sarangi S.K.* Effect of lead on metallothionein concentration in lead-resistant bacteria *Bacillus cereus* isolated from industrial effluent // *Afr. J. Biotechnol.* – 2011. – 10. – P. 15966–15972. <https://doi.org/10.5897/AJB11.1645>
64. *Muter O.* Current trends in bioaugmentation tools for bioremediation: a critical review of advances and knowledge gaps // *Microorganisms.* – 2023. – 11, № 3. – P. 710: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030710>
65. *Mystrioti C., Papassiopi N.* A Comprehensive review of remediation strategies for soil and groundwater contaminated with explosives // *Sustainability.* – 2024. – 16, № 3. – P. 961: <https://doi.org/10.3390/su16030961>
66. *Nagar S., Shaw A.K., Anand S., Celin S.M., Rai P.K.* Aerobic biodegradation of HMX by *Planomicrobium flavidum* // *Biotech.* – 2018. – 8, 455: <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1479-5>
67. *Najim A.A., Radeef A.Y., al-Doori I., Jabbar Z.H.* Immobilization: the promising technique to protect and increase the efficiency of microorganisms to remove contaminants // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* – 2024. – 99. – P. 1707–1733. <https://doi.org/10.1002/jctb.7638>
68. *Nyanhongo G.S., Rodrigue Couto S., Gübitz G.* Coupling of 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) metabolites onto humic monomers by a new laccase from *Trametes modesta* // *Chemosphere.* – 2006. – 64. – P. 309–319. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.12.034>
69. *Okeke B.C., Giblin T., Frankenberger W.T.* Reduction of perchlorate and nitrate by salt tolerant bacteria // *Environ. Pollut.* – 2002. – 118, № 3. – P. 357–363. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00288-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00288-3)
70. *Otaiku A.A., Alhaji A.I.* Characterization of microbial species in the biodegradation of explosives, military shooting range, Kaduna, Nigeria // *J. Appl. Biotechnol. Bioeng.* – 2020. – 7, № 3. – P. 128–147. <https://doi.org/10.15406/jabb.2020.07.00226>
71. *Oviedo-Ocaña E. R., Hernández-Gómez A. M., Ríos M., Portela A., Sánchez-Torres V., Domínguez I., Komilis D.* A Comparison of two-stage and traditional co-composting of green waste and food waste amended with phosphate rock and sawdust // *Sustainability.* – 2021. – 13, № 3. – P. 1109: <https://doi.org/10.3390/su13031109>
72. *Pan Z., Wu Y., Zhai Q., Tang Y., Liu X., Xu X., Liang S., Zhang H.* Immobilization of bacterial mixture of *Klebsiella variicola* FH-1 and *Arthrobacter* sp. NJ-1 enhances the bioremediation of atrazine-polluted soil environments // *Front. Microbiol.* – 2023. – 14:1056264. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1056264
73. *Pichtel J.* Distribution and fate of military explosives and propellants in soil: A review // *Appl. Environ. Soil Sci.* – 2012. – Volume 2012, Article ID 617236. – P. 1–33: <https://doi.org/10.1155/2012/617236>
74. *Pino-Herrera D. O., Pechaud Y., Huguenot D., Esposito G., van Hullebusch E. D., Oturan M. A.* Removal mechanisms in aerobic slurry bioreactors for



- remediation of soils and sediments polluted with hydrophobic organic compounds: an overview // *J. Hazard. Mater.* – 2017. – 339. – P. 427–449. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.013>
75. *Ridene S., Werfelli N., Mansouri A., Landoulsi A., Abbes C.* Bioremediation potential of consortium *Pseudomonas stutzeri* LBR and *Cupriavidus metallidurans* LBJ in soil polluted by lead // *PLoS ONE.* – 2023. – 18(6): e0284120: doi: 10.1371/journal.pone.0284120.
 76. *Rodríguez-Seijo A., Fernández-Calviño D., Arias-Estévez M., et al.* Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: an ecotoxicological review // *Biol. Fertil. Soils.* – 2024. – 60. – P. 813–844. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>
 77. *Sable H., Kumar V., Mishra R., et al.* Biosorption of hexavalent chromium by *Shewanella putrefaciens* MTCC 8104: response surface methodology optimization and mechanistic insights // *Indian J. Microbiol.* – 2024: doi: 10.1007/s12088-024-01365-9.
 78. *Sakdapetsiri C., Kaokhum N., Pinyakong O.* Biodegradation of crude oil by immobilized *Exiguobacterium* sp. AO-11 and shelf life evaluation // *Sci. Rep.* – 2021. – 11:12990: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92122-1>
 79. *Saleem H., Farooq H., Mazhar R., Shakil S., Fazal S.* A review on bioremediation of heavy metals and hydrocarbons through plant growth-promoting bacteria and composting // *Journal of Bioresource Management.* – 2024. – 11(1): <https://corescholar.libraries.wright.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1694&context=jbm>.
 80. *Sanjana M., Prajna R., Katti U.S., Kavitha R.V.* Bioremediation – the recent drift towards a sustainable environment // *Environ. Sci.: Adv.* – 2024. – 3. – P. 1097–1110. <https://doi.org/10.1039/D3VA00358B>
 81. *Saravanan A., Swaminaathan P., Kumar P.S., Yaashikaa P.R., Kamalesh R., Rangasamy G.* A comprehensive review on immobilized microbes – biochar and their environmental remediation: mechanism, challenges and future perspectives // *Environ. Res.* – 2023. – 236, 1: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116723>
 82. *Serrano-González M.Y., Chandra R., Castillo-Zacarias C., Robledo-Padilla F., Rostro-Alanis M. de J., Parra-Saldivar R.* Biotransformation and degradation of 2,4,6-trinitrotoluene by microbial metabolism and their interaction // *Defence Technol.* – 2018. – 14, № 2. – P. 151–164. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.01.004>
 83. *Sharma A., Biswajit P., Jagdish.* Microbial degradation of expired slurry explosives in mines: a review // *Int. J. Environ. Stud.* – 2014. DOI: 10.1080/00207233.2014.983738
 84. *Sharma K., Sharma P., Sangwan P.* Bioremediation of RDX and HMX contaminated soil employing a biochar-based bioformulation // *Carbon Res.* – 2023. – 2:33: <https://doi.org/10.1007/s44246-023-00068-y>
 85. *Shemer B., Shpigel E., Hazan C., Kabessa Y., Agranat A. J., Belkin S.* Detection of buried explosives with immobilized bacterial bioreporters // *Microb. Biotechnol.* – 2020. – 14. – P. 251–261. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13683>



86. *Shukla S., Mbingwa G., Khanna S., Dalal J., Sankhyan D., Malik A., Badhwar N.* Environment and health hazards due to military metal pollution: a review // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. – 2023. – 20: doi: 10.1016/j.enmm.2023.100857.
87. *Siles J.A., Margesin R.* Insights into microbial communities mediating the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil from an Alpine former military site // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* – 2018. – 102. – P. 4409–4421. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8932-6>
88. *Singh N., Gupta S., Marwa N., Pandey V., Verma P.C., Rathaur S., Singh N.* Arsenic mediated modifications in *Bacillus aryabhatai* and their biotechnological application for arsenic bioremediation // *Chemosphere*. – 2016. – 164. – P. 524–534. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.119>
89. *Sinha A., Pant K.K., Khare S.K.* Studies on mercury bioremediation by alginate immobilized mercury tolerant *Bacillus cereus* cells // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* – 2012. – 2071: 10.1016/j.ibiod.2011.12.014.
90. *Snape J.R., Walkley N.A., Morby A.P., Nicklin S., White G.F.* Purification, properties, and sequence of glycerol trinitrate reductase from *Agrobacterium radiobacter* // *J. Bacteriol.* – 1997. – 179, № 24. – P. 7796–7802. <https://doi.org/10.1128/jb.179.24.7796-7802.1997>
91. *Sun J., Wang F., Jia X., Wang X., Xiao X., Dong H.* Research progress of bio-slurry remediation technology for organic contaminated soil // *RSC Adv.* – 2023. – 13, № 15. – P. 9903–9917. <https://doi.org/10.1039%2Fd2ra06106f>
92. *Tran T.M., Lee J.U.* Biosorption of Cd by an indigenous Cd-resistant bacterium isolated from soil contaminated with Cd // *Geosci J.* – 2024. – 28. – P. 15–25. <https://doi.org/10.1007/s12303-023-0031-8>
93. *USEPA.* Innovative uses of compost: composting of soils contaminated by explosives // U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA. – 1997.
94. *Wang S., Wang X., Zhang C., Li F., Guo G.* Bioremediation of oil sludge contaminated soil by landfarming with added cotton stalks // *Int. Biodeterior. Biodegradation.* – 2016. – 106. – P. 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.014>
95. *Wróbel M., Śliwakowski W., Kowalczyk P., Kramkowski K., Dobrzyński J.* Bioremediation of heavy metals by the genus *Bacillus* // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2023. – 20(6). – P. 4964: 10.3390/ijerph20064964.
96. *Yan X., Gao B., Wang J., Zhu X., Zhang M.* Insights into remediation effects and bacterial diversity of different remediation measures in rare earth mine soil with SO₄²⁻ and heavy metals // *Front. Microbiol.* – 2023. – 14: doi: 10.3389/fmicb.2023.1050635.
97. *Zhang Z., Fan Z., Zhang G., Qin L., Fang J.* Application progress of microbial immobilization technology based on biomass materials // *BioResources.* – 2021. – 16, № 4. – P. 8509–8524. DOI: 10.15376/biores.16.4.Zhang



REFERENCES

1. Dmitrenko OV, Demianiuk OS, Pohorila LP, Svidiniuk NL, Rozha VV, Kyryliuk PM, Romanenko VM. Ekotoksykologichna otsinka dernovo-pidzolyss-toho hruntu za vplyvu boiovykh dii. *Agroekologichnyi zhurnal*. 2023;(4):89-96. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293758> [in Ukrainian].
2. Zaitsev YO, Hryshchenko OM, Romanova SA, Zaitseva IO. Vplyv boiovykh dii na vmist valovykh form vazhkykh metaliv u hruntakh Sums'koho ta Okhtyrskoho raioniv Sums'koi oblasti. *Agroekologichnyi zhurnal*. 2022;(3):136-149. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419> [in Ukrainian].
3. Zbytky dovkilliu vnaslidok zbroinoi ahresii RF: aktualna informatsiia. Sait Derzhavnoi ekologichnoi inspektsii Ukrainy. Available from: <https://www.dei.gov.ua/> (Accessed August 12, 2024) [in Ukrainian].
4. Kuzyk AD, Tovarianskyi VI. Vplyv voiennykh dii na lisovi systemy Ukrainy ta yikh pisliavoienne vidnovlennia. *Visnyk Lvivskoho derzhavnogo universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*. 2023;(27):16-22. <https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.02> [in Ukrainian].
5. Lisova N. Vplyv viiskovykh dii v Ukraini na ekologichnyi stan terytorii. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnogo pedahohichnogo universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Heohrafiia*. 2017;(2):165-173 [in Ukrainian].
6. Pysarenko PV, Samoilyk MS, Halytska MA, Dychenko OY, Taranenko SV. Doslidzhennia vplyvu tekhnohennoho zabrudnennia vnaslidok voiennykh dii na pokaznyky hruntu ahrotsenoziv. *Ahrarni innovatsii*. 2022;(14):94-102. <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2022.14.14> [in Ukrainian].
7. Shumyhai IV, Konishchuk VV, Moroz VV, Manishevskia NM. Bioheokhimichna, fiziologichna adaptivnist pshenytsi ozymoi (*Triticum L.*) za vplyvu vazhkykh metaliv u lisostepu Ukrainy. *Agroekologichnyi zhurnal*. 2023;(1):101-109. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2023.276734>
8. Abo-Alkasem MI, Hassan NH, Abo Elsoud MM. Microbial bioremediation as a tool for the removal of heavy metals. *Bull Natl Res Cent*. 2023;47:31. <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01006-z> [in Ukrainian].
9. Aburto-Medina A, Shahsavari E, Taha M, Bates A, Van Ieperen L, Ball AS. The impacts of different biological treatments on the transformation of explosives waste contaminated sludge. *Molecules*. 2021;26(16):4814. doi: 10.3390/molecules26164814.
10. Adams GO, Fufeyin PT, Okoro SE, Ehinomen I. Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review. *Int J Environ Bioremed Biodegrad*. 2015;3(1):28-39. DOI:10.12691/ijebb-3-1-5
11. Ahmad F, Hughes JB. Anaerobic transformation of TNT by *Clostridium*. In: Spain JC, Hughes JB, Knackmuss HJ, editors. *Biodegradation of nitro aromatic compounds and explosives*. Boca Raton, FL: Lewis; 2000. p. 185-212. DOI:10.1201/9781420032673.ch8.
12. Ajeel NS, Mohammed AJ. Bioremediation of contaminated soil with hydrocarbons discharged from liquid petroleum gas filling refineries by *Burkholderia cepacia*. *Int J Health Sci*. 2022;6(S9):1084-1093. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS9.12417>.



13. Aderonke KA, Oladimeji OO, Shittu OB, Okeyode IC, Taiwo MO. Bioaccumulation of heavy metals using selected organisms isolated from electronic waste dumpsite of two south-western states in Nigeria. *Appl Environ Res.* 2017;39(2):29-40. <https://doi.org/10.35762/AER.2017.39.2.3>.
14. Alam MZ, Ahmad S. Multi-metal biosorption and bioaccumulation by *Exiguobacterium* sp. ZM-2. *Ann Microbiol.* 2013;63:1137-1146. <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0571-z>.
15. Ali N, Dashti N, Khanafer M, Al-Awadhi H, Radwan S. Bioremediation of soils saturated with spilled crude oil. *Sci Rep.* 2020;10:1116. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57224-x>.
16. Alori ET, Gabasawa AI, Elenwo CE, Agbeyegbe OO. Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment. *Front Soil Sci.* 2022;2:937186. DOI: 10.3389/fsoil.2022.937186.
17. Altowayti WAH, Algaifi HA, Bakar SA, Shahir S. The adsorptive removal of As (III) using biomass of arsenic resistant *Bacillus thuringiensis* strain WS3: characteristics and modelling studies. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2019;172:176-185. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.067.
18. Andrezza R, Pieniz S, Wolf L, Lee MK, Camargo FAO, Okeke BC. Characterization of copper bioreduction and biosorption by a highly copper resistant bacterium isolated from copper-contaminated vineyard soil. *Sci Total Environ.* 2010;408(7):1501-1507. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.12.017.
19. Anekwe IMS, Isa YM. Application of biostimulation and bioventing system as bioremediation strategy for the treatment of crude oil contaminated soils. *Soil Water Res.* 2024;19(2):100-110. DOI: 10.17221/66/2023-SWR.
20. Belapurkar P, Goyal P, Kar A. In vitro evaluation of bioremediation capacity of a commercial probiotic, *Bacillus coagulans*, for chromium (VI) and lead (II) toxicity. *J Pharm Bioallied Sci.* 2016;8:272-276. doi: 10.4103/0975-7406.199344.
21. Bhushan B, Halasz A, Thiboutot S, Ampleman G, Hawari J. Chemotaxis-mediated biodegradation of cyclic nitramine explosives RDX, HMX, and CL-20 by *Clostridium* sp. EDB2. *Biochem Biophys Res Commun.* 2004;316(3):816-821. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2004.02.120>.
22. Broomandi P, Guney M, Kim JR, Karaca F. Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review. *Sustainability.* 2020;12(21):9002. <https://doi.org/10.3390/su12219002>.
23. Brown DM, Okoro S, van Gils J, van Spanning R, Bonte M, Hutchings T, Linden O, Egbuche U, Bruun KB, Smith JWN. Comparison of landfarming amendments to improve bioremediation of petroleum hydrocarbons in Niger Delta soils. *Sci Total Environ.* 2017;596-597:284-292. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.072.
24. Chen Z, Pan X, Chen H, Lin Z, Guan X. Investigation of lead (II) uptake by *Bacillus thuringiensis* 016. *World J Microbiol Biotechnol.* 2015;31:1729-1736. doi: 10.1007/s11274-015-1923-1.
25. Chonoko UG, Abdullahi IO, Ado SA, Whong CMZ. Hydrocarbon degradation by autochthonous species of *Bacillus cereus* and *Pseudomonas aeruginosa* isolated from Kaduna refinery effluents. *Cont J Biol Sci.* 2017;10(2):10-26. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.839052>.



26. Corredor D, Duchicela J, Flores F J, Maya M, Guerrero E. Review of explosive contamination and bioremediation: insights from microbial and bio-omic approaches. *Toxics*. 2024;12:249. <https://doi.org/10.3390/toxics12040249>.
27. Craig H, Sisk W, Nelson M, Dana W. Bioremediation of explosives-contaminated soils: a status review. In: Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research, Manhattan, KS, USA, 23–24 May 1995. p. 164.
28. Danial AW, Dardir FM. Copper biosorption by *Bacillus pumilus* OQ931870 and *Bacillus subtilis* OQ931871 isolated from Wadi Nakheil, Red Sea, Egypt. *Microb Cell Fact*. 2023;22:152. doi: 10.1186/s12934-023-02166-3.
29. Das K, Mukherjee AK. Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from North-East India. *Bioresour Technol*. 2007;98(7):1339–1345. doi: 10.1016/j.biortech.2006.05.032.
30. Dong Y, Lang Z, Kong X, Lu D, Liu Z. Kinetic and multidimensional profiling of accelerated degradation of oil sludge by biostimulation. *Environ Sci Process Impact*. 2015;17:763–774. <https://doi.org/10.1039/c4em00428k>.
31. Drzyzga O, Bruns-Nagel D, Gorontzy T, Blotvogel K.-H, Gemsa D. Mass balance studies with ¹⁴C-labeled 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) mediated by an anaerobic *Desulfovibrio* species and an aerobic *Serratia* species. *Curr Microbiol*. 1998;37:380–386. doi: 10.1007/s002849900397.
32. Eaton HL, Durringer JM, Murty LD, Craig AM. Anaerobic bioremediation of RDX by ovine whole rumen fluid and pure culture isolates. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2013;97:3699–3710. doi: 10.1007/s00253-012-4172-3.
33. Elgh-Dalgren K, Waara S, Duker A, von Kronhelm T, van Hees P. Anaerobic bioremediation of a soil with mixed contaminants: explosives degradation and influence on heavy metal distribution, monitored as changes in concentration and toxicity. *Water Air Soil Pollut*. 2009;202:301–313. doi: 10.1007/s11270-009-9977-z.
34. Fernandez-Lopez C, Posada-Baquero R, Ortega-Calvo J-J. Nature-based approaches to reducing the environmental risk of organic contaminants resulting from military activities. *Sci Total Environ*. 2022;843. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157007>.
35. Forján R, Lores I, Sierra C, Baragaño D, Gallego JLR, Peláez AI. Bioaugmentation treatment of a PAH-polluted soil in a slurry bioreactor. *Appl Sci*. 2020;10(8):2837. <https://doi.org/10.3390/app10082837>.
36. Fowler SJ, Toth CRA, Gieg LM. Community structure in methanogenic enrichments provides insight into syntrophic interactions in hydrocarbon-impacted environments. *Front Microbiol*. 2016;7:562. doi: 10.3389/fmicb.2016.00562.
37. García-Alcántara JA, Maqueda-Gálvez AP, Téllez-Jurado A, Hernández-Martínez R, Lizardi-Jiménez MA. Maya crude-oil degradation by a *Bacillus licheniformis* consortium isolated from a Mexican thermal source using a bubble column bioreactor. *Water Air Soil Pollut*. 2016;227:413. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3121-7>.



38. Habineza A, Zhai J, Mai T, Mmereki D, Ntakirutimana T. Biodegradation of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) in contaminated soil and microbial remediation options for treatment. *Period Polytech Chem Eng.* 2017;61:171–187. <https://doi.org/10.3311/PPch.9251>.
39. Hawari A, Halasz T, Sheremata T, et al. Characterization of metabolites during biodegradation of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) with municipal anaerobic sludge. *Appl Environ Microbiol.* 2000;66(6):2652–2657. doi: 10.1128/aem.66.6.2652-2657.2000.
40. Hryhorczuk D, Levy BS, Prodanchuk M, Kravchuk O, Bubalo N., Hryhorczuk A, Erickson TB. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *J Occup Med Toxicol.* 2024;19(1). <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>.
41. Jaafaryneya M, Amani J, Halabian R. Biodegradation of 2,4,6-trinitrotoluene and hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine by *Actinomyces* species, first time isolated and characterized from water, wastewater, and sludge. *Water Environ J.* 2023;37(3):538–548. <https://doi.org/10.1111/wej.12857>.
42. Johnsen AR, Boe US, Henriksen P, Malmquist LMV, Christensen J.H. Full-scale bioremediation of diesel-polluted soil in an Arctic landfarm. *Environ Pollut.* 2021;280. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116946>.
43. Kaida N, Habib S, Yasid NA, Shukor MYA. Biodegradation of petroleum hydrocarbons by *Bacillus* spp.: a review. *Bioremediation Sci Technol Res.* 2018;6(2):14–21. <https://doi.org/10.54987/bstr.v6i2.433>.
44. Kalderis D, Juhasz AL, Boopathy R, Comfort S. Soils contaminated with explosives: environmental fate and evaluation of state-of-the-art remediation processes (IUPAC technical report). *Pure Appl Chem.* 2011;83(7):1407–1484. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-10-01-05>.
45. Keshani-Langroodi S, Lan Y, Stenuit B, Rosen G, Hughes JB, Sales CM. Uncovering the structure and function of microbial communities formed during periodic tilling of TNT and DNT co-contaminated soils. *bioRxiv.* 2020. <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.12.12.420737v1>.
46. Khan MI, Yoo K, Kim S, Cheema SA, Bashir S, Park J. A Sporolactobacillus-, Clostridium-, and Paenibacillus-dominant microbial consortium improved anaerobic RDX detoxification by starch addition. *J. Microbiol. Biotechnol.* 2020; 30(6):839–847. doi: 10.4014/jmb.1910.10034.
47. Kimber RL, Elizondo G, Jedyka K, Boothman C, Cai R, Bagshaw H et al. Copper bioreduction and nanoparticle synthesis by an enrichment culture from a former copper mine. *Environ. Microbiol.* 2023; 25(12):3139–3150. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.16488>.
48. Kolwzan B, Grabas K, Pawelczyk A. Bioremediation of military area contaminated by petroleum products. *Geotechnics of Waste Management and Remediation (GeoCongress): Proc. Conf.* 2012. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40970%28309%2963>.
49. Li DS, Feng JQ, Liu YF, Zhou L, Liu JF, Gu JD, Mu BZ, Yang SZ. Enrichment and immobilization of oil-degrading microbial consortium on different sorbents for bioremediation testing under simulated aquatic and soil condi-



- tions. Appl. Environ. Biotechnol. 2019; 5(1):1–11. <https://www.udspub.com/ajj/public/index.php/aeb/article/view/509>.
50. Li M, Liu S, Wang Y, Do H, Zhao C. Effect of coexisting metal ions on bio-precipitation of Cu^{2+} phosphate by *Rahnella sp.* LRP3 and its stability in soil. Plant Soil Environ. 2021; 67(12):729–738. <https://doi.org/10.17221/279/2021-PSE>.
 51. Limcharoensuk T, Sooksawat N, Sumarnrote A, Awutpet T, Kruatrachue M, Pokethitiyook P, Auesukaree C. Bioaccumulation and biosorption of Cd^{2+} and Zn^{2+} by bacteria isolated from a zinc mine in Thailand. Ecotoxicol. Environ. Saf. 2015; 122:322–330. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.08.013.
 52. Lin C, Cheruiyot NK, Bui XT, Ngo HH. Composting and its application in bioremediation of organic contaminants. Bioengineered. 2022; 13(1):1073–1089. doi: 10.1080/21655979.2021.2017624.
 53. Lin C, Sheu D-S, Lin T-C, Cao CM, Grasso D. Thermophilic biodegradation of diesel oil in food waste composting processes without bioaugmentation. Environ Eng Sci. 2012; 29(2):117–123. <https://doi.org/10.1089/ees.2010.0212>.
 54. Liu P, Zhang Y, Tang Q, Shi S. Bioremediation of metal-contaminated soils by microbially-induced carbonate precipitation and its effects on ecotoxicity and long-term stability. Biochem. Eng. J. 2021; 166. doi: 10.1016/j.bej.2020.107856.
 55. Lorenz A, Rylott EL, Strand SE, Bruce NC. Towards engineering degradation of the explosive pollutant hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine in the rhizosphere. FEMS Microbiol. Lett. 2013; 340:49–54. doi: 10.1111/1574-6968.12072.
 56. Lv Y, Zhu X, Zhang M, Liu X, Wang J. In-situ bioremediation of multiple heavy metals contaminated farmland soil by sulfate-reducing bacteria. Polish J. Environ. Stud. 2022; 31(2):1747–1755. <https://doi.org/10.15244/pjoes/141326>.
 57. Mambwe M, Kalebaila KK, Johnson T. Photochemical oxidation and land-farming as remediation techniques for oil-contaminated soil. GJESM. 2024; 10(2):517–536. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.02.07>.
 58. Marwa A. Influence of organic waste on bioremediation of oil-contaminated soil. Ecological Engineering & Environmental Technology. 2024; 25(5):32–41. <https://doi.org/10.12912/27197050/184238>.
 59. Mehrotra T, Dev S, Banerjee A, Chatterjee A, Singh R, Aggarwal S. Use of immobilized bacteria for environmental bioremediation: a review. J. Environ. Chem. Eng. 2021; 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105920>.
 60. Mercimek HA, Dincer S, Guzeldag G, Ozsavli A, Matyar F, Arkut A, Kayis F, Sumengen Ozdenefe M. Degradation of 2,4,6-trinitrotoluene by *P. aeruginosa* and characterization of some metabolites. Braz. J. Microbiol. 2015; 46(1):103–111. doi: 10.1590/S1517-838246120140026.
 61. Molokwane PE, Meli CK, Chirwa EMN. Chromium (VI) reduction in activated sludge bacteria exposed to high chromium loading. Water Sci. Technol. 2008; 58(2):399–405. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.07.040>.



62. Morales-Guzman G, Ferrera-Cerrato R, Rivera-Cruz MC, Torres-Bustillos L.G., Arteaga-Garibay RI, Mendoza-Lopez MR, Esquivel-Cote R, Alarcon A. Diesel degradation by emulsifying bacteria isolated from soils polluted with weathered petroleum hydrocarbons. *Appl. Soil Ecol.* 2017; 121:127-134. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.003>.
63. Murthy S, Geetha B, Sarangi SK. Effect of lead on metallothionein concentration in lead-resistant bacteria *Bacillus cereus* isolated from industrial effluent. *Afr. J. Biotechnol.* 2011; 10:15966–15972. <https://doi.org/10.5897/AJB11.1645>.
64. Muter O. Current trends in bioaugmentation tools for bioremediation: a critical review of advances and knowledge gaps. *Microorganisms.* 2023; 11(3):710. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030710>.
65. Mystrioti C, Papassiopi NA. Comprehensive review of remediation strategies for soil and groundwater contaminated with explosives. *Sustainability.* 2024; 16(3):961. <https://doi.org/10.3390/su16030961>.
66. Nagar S, Shaw AK, Anand S, Celin SM, Rai PK. Aerobic biodegradation of HMX by *Planomicrobium flavidum*. *Biotech.* 2018; 8:455. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1479-5>.
67. Najim AA, Radeef AY, al-Doori I, Jabbar ZH. Immobilization: the promising technique to protect and increase the efficiency of microorganisms to remove contaminants. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2024; 99:1707–1733. <https://doi.org/10.1002/jctb.7638>.
68. Nyanhongo GS, Rodriguez Couto S, Gübitz G. Coupling of 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) metabolites onto humic monomers by a new laccase from *Trametes modesta*. *Chemosphere.* 2006; 64:309–319. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.12.034>.
69. Okeke BC, Giblin T, Frankenberger WT. Reduction of perchlorate and nitrate by salt tolerant bacteria. *Environ. Pollut.* 2002; 118(3):357–363. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00288-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00288-3).
70. Otaiku AA, Alhaji AI. Characterization of microbial species in the biodegradation of explosives, military shooting range, Kaduna, Nigeria. *J. Appl. Biotechnol. Bioeng.* 2020; 7(3):128–147. <https://doi.org/10.15406/jabb.2020.07.00226>.
71. Oviedo-Ocaña ER, Hernández-Gómez AM, Ríos M, Portela A, Sánchez-Torres V, Domínguez I, Komilis DA. Comparison of two-stage and traditional co-composting of green waste and food waste amended with phosphate rock and sawdust. *Sustainability.* 2021; 13(3):1109. <https://doi.org/10.3390/su13031109>.
72. Pan Z, Wu Y, Zhai Q, Tang Y, Liu X, Xu X, Liang S, Zhang H. Immobilization of bacterial mixture of *Klebsiella variicola* FH-1 and *Arthrobacter sp.* NJ-1 enhances the bioremediation of atrazine-polluted soil environments. *Front. Microbiol.* 2023; 14:1056264. doi: 10.3389/fmicb.2023.1056264.
73. Pichtel J. Distribution and fate of military explosives and propellants in soil: A review. *Appl. Environ. Soil Sci.* 2012; Volume 2012, Article ID 617236. P. 1–33. <https://doi.org/10.1155/2012/617236>.



74. Pino-Herrera DO, Pechaud Y, Huguenot D, Esposito G, van Hullebusch ED., Oturan MA. Removal mechanisms in aerobic slurry bioreactors for remediation of soils and sediments polluted with hydrophobic organic compounds: an overview. *J. Hazard. Mater.* 2017; 339:427–449. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.013>.
75. Ridene S, Werfelli N, Mansouri A, Landoulsi A, Abbes C. Bioremediation potential of consortium *Pseudomonas stutzeri* LBR and *Cupriavidus metallidurans* LBJ in soil polluted by lead. *PLoS ONE.* 2023; 18(6): e0284120. doi: 10.1371/journal.pone.0284120.
76. Rodríguez-Seijo A, Fernández-Calviño D, Arias-Estévez M, et al. Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: an ecotoxicological review. *Biol. Fertil. Soils.* 2024; 60:813–844. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01835-8>.
77. Sable H, Kumar V, Mishra R, et al. Biosorption of hexavalent chromium by *Shewanella putrefaciens* MTCC 8104: response surface methodology optimization and mechanistic insights. *Indian J. Microbiol.* 2024. doi: 10.1007/s12088-024-01365-9.
78. Sakdapetsiri C, Kaokhum N, Pinyakong O. Biodegradation of crude oil by immobilized *Exiguobacterium sp.* AO-11 and shelf life evaluation. *Sci. Rep.* 2021; 11:12990. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92122-1>.
79. Saleem H, Farooq H, Mazhar R, Shakil S, Fazal S. A review on bioremediation of heavy metals and hydrocarbons through plant growth-promoting bacteria and composting. *Journal of Bioresource Management.* 2024; 11(1). <https://corescholar.libraries.wright.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1694&context=jbm>.
80. Sanjana M, Prajna R, Katti US, Kavitha RV. Bioremediation – the recent drift towards a sustainable environment. *Environ. Sci.: Adv.* 2024; 3:1097–1110. <https://doi.org/10.1039/D3VA00358B>.
81. Saravanan A, Swaminaathan P, Kumar PS, Yaashikaa PR, Kamalesh R, Rangasamy GA comprehensive review on immobilized microbes - biochar and their environmental remediation: mechanism, challenges and future perspectives. *Environ. Res.* 2023; 236(1). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116723>.
82. Serrano-González MY, Chandra R, Castillo-Zacarias C, Robledo-Padilla F, Rostro-Alanis M. de J, Parra-Saldivar R. Biotransformation and degradation of 2,4,6-trinitrotoluene by microbial metabolism and their interaction. *Defence Technol.* 2018; 14(2):151–164. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.01.004>.
83. Sharma A, Biswajit P, Jagdish. Microbial degradation of expired slurry explosives in mines: a review. *Int. J. Environ. Stud.* 2014. doi: 10.1080/00207233.2014.983738.
84. Sharma K, Sharma P, Sangwan P. Bioremediation of RDX and HMX contaminated soil employing a biochar-based bioformulation. *Carbon Res.* 2023; 2:33. <https://doi.org/10.1007/s44246-023-00068-y>.
85. Shemer B, Shpigel E, Hazan C, Kabessa Y, Agranat AJ, Belkin S. Detection of buried explosives with immobilized bacterial bioreporters. *Microb.*



- Biotechnol. 2020; 14:251–261. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13683>.
86. Shukla S, Mbingwa G, Khanna S, Dalal J, Sankhyan D, Malik A, Badhwar N. Environment and health hazards due to military metal pollution: a review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2023; 20. doi: 10.1016/j.enmm.2023.100857.
 87. Siles JA, Margesin R. Insights into microbial communities mediating the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil from an Alpine former military site. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2018; 102:4409–4421. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8932-6>.
 88. Singh N, Gupta S, Marwa N, Pandey V, Verma PC, Rathaur S, Singh N. Arsenic mediated modifications in *Bacillus aryabhatai* and their biotechnological application for arsenic bioremediation. *Chemosphere*. 2016; 164:524–534. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.119>.
 89. Sinha A, Pant KK, Khare SK. Studies on mercury bioremediation by alginate immobilized mercury tolerant *Bacillus cereus* cells. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2012. doi: 10.1016/j.ibiod.2011.12.014.
 90. Snape JR, Walkley NA, Morby AP, Nicklin S, White GF. Purification, properties, and sequence of glycerol trinitrate reductase from *Agrobacterium radiobacter*. *J. Bacteriol.* 1997; 179(24):7796–7802. <https://doi.org/10.1128/jb.179.24.7796-7802.1997>.
 91. Sun J, Wang F, Jia X, Wang X, Xiao X, Dong H. Research progress of bio-slurry remediation technology for organic contaminated soil. *RSC Adv.* 2023; 13(15):9903–9917. <https://doi.org/10.1039/d2ra06106f>.
 92. Tran TM, Lee JU. Biosorption of Cd by an indigenous Cd-resistant bacterium isolated from soil contaminated with Cd. *Geosci J.* 2024; 28:15–25. <https://doi.org/10.1007/s12303-023-0031-8>.
 93. USEPA. Innovative uses of compost: composting of soils contaminated by explosives. U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA. 1997.
 94. Wang S, Wang X, Zhang C, Li F, Guo G. Bioremediation of oil sludge contaminated soil by landfarming with added cotton stalks. *Int. Biodeterior. Biodegradation.* 2016; 106:150–156. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.014>.
 95. Wróbel M, Śliwakowski W, Kowalczyk P, Kramkowski K, Dobrzyński J. Bioremediation of heavy metals by the genus *Bacillus*. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2023; 20(6):4964. doi: 10.3390/ijerph20064964.
 96. Yan X, Gao B, Wang J, Zhu X, Zhang M. Insights into remediation effects and bacterial diversity of different remediation measures in rare earth mine soil with SO₄²⁻ and heavy metals. *Front. Microbiol.* 2023; 14. doi: 10.3389/fmicb.2023.1050635.
 97. Zhang Z, Fan Z, Zhang G, Qin L, Fang J. Application progress of microbial immobilization technology based on biomass materials. *BioResources.* 2021; 16(4):8509–8524. doi: 10.15376/biores.16.4.Zhang.

Стаття надійшла до редакції 26.08.2024 р.

