

ТЕОРЕТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ

Феномен бомботурбації та механічна деструкція ґрунтового покриву

Сучасні воєнні дії завдають глибоких екологічних пошкоджень усім компонентам біосфери, проте найбільш довготривалих і часто незворотних трансформацій зазнає ґрунтово-літогенна основа ландшафту. Основним процесом механічного руйнування земель під час артилерійських, мінометних та авіаційних обстрілів є бомботурбація (або воєнна турбація) — перемішування, винос та деструкція ґрунтових горизонтів і підстилаючих порід унаслідок детонації вибухових речовин.

Під час вибуху боєприпасу утворюється вирва, геометричні параметри якої (діаметр, глибина, об'єм) залежать від калібру зброї, типу підричника (контактний, уповільненої дії) та фізико-механічних властивостей самого ґрунту (вологості, щільності, гранулометричного складу). Механічний вплив бомботурбації на ландшафт поділяється на кілька зон:

- Зона кратера (вирви): ділянка повного знищення ґрунтового профілю. Родючий шар тут або повністю випадає (мінералізується), або викидається вибуховою хвилею на периферію. На дні та стінках вирви оголюються нижні літогенні шари (інертні глини, суглинки, піски, мергель), які не мають агрономічної цінності.
- Зона бруствера (викиду): територія навколо вирви, де осідають підняті вибухом маси поглибленого субстрату. Вони накривають собою збережений суміжний ґрунтовий покрив, формуючи так звані «поховані ґрунти». Це призводить до інверсії ґрунтових горизонтів, коли менш родючі породи опиняються на поверхні ріллі.
- Зона струсу та мікротріщин: прилегла до кратера зона, де під дією надвисокого тиску та сейсмічної хвилі руйнується природна агрегатна структура ґрунту, утворюються порожнечі або, навпаки, зони локального спресовування.

Паралельно з бомботурбацією відбувається техногенне (пірогенне) ущільнення ландшафту, спричинене пересуванням важкої колісно-гусеничної військової техніки (танків, БТР, БМП, САУ, вантажівок). Механічний тиск настільки деформує архітекtonіку ґрунту, що щільність складення перевищує критичні межі. Це зумовлює зникнення капілярної пористості, різке зниження водопроникності та аерації, формуючи водупорний шар («плужну або танкову підощву»), що викликає застій вологи та провокує прискорену лінійну або площинну ерозію під час дощів чи танення снігу.

Геохімічна трансформація та токсикологічні ризики мілітарних ландшафтів

Окрім очевидного механічного руйнування рельєфу, мілітарний тиск супроводжується інтенсивним і різноплановим хімічним забрудненням. Головними джерелами екотоксикантів є продукти згоряння пороху, вибухові речовини та металеві уламки корпусів боєприпасів. Потрапляючи у ґрунтовий розчин, вони змінюють його базові фізико-хімічні константи та мігрують трофічними ланцюгами.

1. Локальне техногенне закислення (ацидифікація): Детонація боєприпасів супроводжується виділенням значних об'ємів газів, що містять оксиди сірки (SO_x), азоту (NO_x) та вуглецю (CO_x). Взаємодіючи із ґрунтовою вологою, ці сполуки утворюють слабкі розчини кислот. Як наслідок, показник кислотності (pH) в епіцентрі вибухів різко падає (іноді до 4,5–4,8). Кисле середовище є агресивним: воно активує рухливість більшості токсичних елементів, полегшуючи їхнє засвоєння рослинами, та водночас вимиває корисні кальцій і магній.

2. Забруднення важкими металами: Корпуси боєприпасів та детонатори містять цілий спектр металів: свинець (Pb), кадмій (Cd), нікель (Ni), цинк (Zn), мідь (Cu), сурму (Sb) та хром (Cr). Корозія осколків у вологому ґрунті призводить до поступового вивільнення цих елементів. Особливу небезпеку становлять свинець і кадмій, які належать до I класу небезпеки. Вони мають персистентний (стійкий) характер, не піддаються біологічному розкладу, накопичуються в гумусі та мають здатність заміщувати життєво важливі елементи (наприклад, кальцій у кістках або залізо в гемоглобіні) в організмі людини та тварин через споживання вирощеної продукції.

3. Залишки ксенобіотиків (вибухових речовин): Тротил (тринітротолуол, TNT), гексоген (RDX) та тетрил є штучно синтезованими сполуками, які є чужорідними для живої природи. Багато з них мають високу стійкість до розпаду в анаеробних умовах (на дні засипаних вирв). Вони мають пряму мутагенну, канцерогенну та загальнотоксичну дію на живі організми.

Біоценотична деградація та пригнічення ґрунтової біоти

Ґрунт є не просто орґано-мінеральною масою, а живою екосистемою (педосферою), стабільність якої підтримується мікро- та мезобіотою. Бомботурбація викликає глибокий біоценотичний шок:

1. Термічна стерилізація: В момент детонації температура в епіцентрі вибуху сягає 1500–3000 °C. Це призводить до миттєвого випалювання органічної

речовини (гумусу) та повної теплової стерилізації навколократерного простору. Гинуть корисні ґрунтові супутники: бактерії-азотфіксатори, нітрифікатори, мікоризні гриби та дощові черв'яки, які відповідають за структурування та живлення ґрунту.

2. Токсичне пригнічення (інгібування): Навіть ті мікроорганізми, що вижили на периферії вибуху, зазнають стресу через високі концентрації тротилу та важких металів. Спостерігається різке падіння ферментативної активності ґрунту (каталази, інвертази, фосфатази), що блокує природний колообіг азоту, фосфору та калію. Ґрунт стає «біологічно мертвим», а на заміну корисній мікрофлорі часто приходять фітопатогенні цвілеві гриби.

Методологія та етапи рекультивації мілітарно порушених земель

Відновлення екологічних функцій та родючості земель, що зазнали мілітарного впливу, вимагає суворого дотримання послідовності науково обґрунтованих етапів. На відміну від класичної промислової рекультивації (наприклад, кар'єрів), тут обов'язковим є попередній інженерно-безпековий блок.

Етап 0: Попередній (Безпековий). Будь-які агротехнічні чи інженерні роботи на територіях, де велися бойові дії, категорично заборонені до моменту повного проведення гуманітарного розмінування. Сапери виконують нетехнічне та технічне обстеження, виявляють та знешкоджують нерозірвані боєприпаси (НРБ), міни та розтяжки. Наступним кроком є механічний збір великих та дрібних металевих осколків снарядів, оскільки вони не лише є джерелом корозійного забруднення важкими металами, а й можуть вивести з ладу сільськогосподарську техніку (плуги, борони, чизелі).

Етап 1: Гірничотехнічна (технічна) рекультивація. Головна мета цього етапу — відновлення геоморфологічної цілісності рельєфу та ліквідація фізичних деформацій:

1. Ландшафтне планування поверхні: засипання вирв та траншей. Оптимальним підходом є використання породи з брустверів (викидів вибуху). Засипання виконують пошарово (сегментами по 25–30 см) з обов'язковим пошаровим механічним ущільненням. Якщо просто засипати вирву пухкою землею, через 1–2 роки під дією опадів відбудеться сильне просідання, і на полі знову утвориться блюдцеподібне заглиблення, де застоюватиметься вода.

2. Глибока декомпресія (чизелювання): Для руйнування переущільнених коліями танків зон застосовують глибокорозпушувачі (чизелі), які без

перевертання пласта розпушують ґрунт на глибину 40–50 см, повертаючи йому пористість та здатність поглинати дощову воду.

3. Збереження та нанесення гумусового шару: поверх вирівняної та декомпресованої літогенної основи наноситься родючий шар ґрунту (завтовшки не менше 20–30 см).

Етап 2: Біологічна рекультивація. Цей етап спрямований на детоксикацію, хімічну меліорацію та регенерацію живого компонента ґрунту.

- Хімічна нейтралізація та стабілізація: Оскільки ґрунт підкислений, у нього вносять лужні меліоранти — вапнякове борошно, крейду або дефекат. Кальцій (Ca^{2+}) витісняє зі зваженого стану іони водню, піднімаючи рН до нейтрального рівня. Одночасно з цим у нейтральному або слаболужному середовищі важкі метали (Pb, Cd) переходять у форму нерозчинних карбонатів або гідроксидів. Вони стають хімічно пасивними і більше не можуть засвоюватися корінням рослин. Для посилення цього ефекту додають адсорбенти — цеоліти або біовугілля (biochar), які надовго зв'язують токсиканти у своїй пористій структурі.

- Фіторе mediaція: Використання спеціальних рослин для очищення субстрату. Найчастіше застосовують технологію фітоекстракції, висаджуючи рослини-гіперакумулятори (*Brassica juncea* (гірчиця сиза), *Helianthus annuus* (соняшник)). Вони здатні поглинати великі об'єми важких металів із глибинних шарів і накопичувати їх у своїй надземній біомасі. Після завершення сезону рослини скошують під корінь і вивозять на утилізацію. Спалювання такої біомаси проводять у спеціальних закритих печах промислових підприємств, де утворений попіл (концентрат важких металів) ховають на спецполігонах.

- Агробіологічна регенерація (сидерація та бактеризація): На заключній стадії рекультивації поле засівають бобовими культурами-сидератами (люпин, вика, конюшина). Їхнє коріння розпушує ґрунт, а перед посівом насіння обробляють (інокулюють) препаратами азотфіксуючих бактерій. Сидерати накопичують органічну речовину, азот і дають старт відновленню природного корисного мікробіоценозу екосистеми. Тільки після повного циклу такої підготовки землі можна повертати в інтенсивне сільськогосподарське виробництво.