



Технології рекультивації пошкоджених земель з використанням ШІ та робототехнічних пристроїв

Науково-методичні рекомендації

Київ - 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

УКРАЇНИ МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ТЕХНОЛОГІЇ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ПОШКОДЖЕНИХ ЗЕМЕЛЬ
З ВИКОРИСТАННЯМ ШІ
ТА РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ**

Науково-методичні рекомендації

КИЇВ – 2025

УДК [519.6+004.8+004.9]:631

Рекомендації розроблені на основі результатів досліджень, проведених на кафедрах комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, економічної кібернетики та інформаційних систем і технологій Національного університету біоресурсів і природокористування України за темою № РН/65-2024 "Центр трансферу технологій штучного інтелекту для відновлення сільськогосподарських земель".

Укладачі: Тонха О.Л., Болбот І.М., Кравченко В.М., Руденський Р.А., Саяпін С.П., Циганов О.М.

Рецензенти:

доктор с.-г. наук, професор Булигін С.Ю.

доктор с.-г. наук, професор Балаєв А.Д.

Розглянуто і схвалено Вченою радою факультету інформаційних технологій Національного університету біоресурсів і природокористування України від «23» червня 2025 р. протокол № 10

ТЕХНОЛОГІЇ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ПОШКОДЖЕНИХ ЗЕМЕЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ШІ ТА РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ

Підписано до друку _____

Ум. друк. арк. 3,2.

Наклад 100 прим.

Формат 60□80 1/16

Обл. вид. арк. 1

Зам. № _____

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Робототехнічні та програмні засоби для рекультивації пошкоджених земель	5
1.1 Використання БПЛА для моніторингу ґрунтів	5
1.2 Наземні платформи в системах моніторингу деградованих ґрунтів	11
1.3 Програмне забезпечення для збору, обробки та аналізу даних рекультивації	14
1.4 Технології класифікації вирв і визначення їх параметрів	19
2 Сценарії рекультивації сільськогосподарських земель, пошкоджених вирвами різної глибини та діаметру залежно від якісних характеристик ґрунту	22
2.1 Вимоги до рекультивованих земельних ділянок сільськогосподарського призначення, порушених воєнними діями	22
2.2 Вимоги до якісних характеристик субстратів, що використовується для формування техноземних конструкцій	23
2.3 Джерела забезпечення субстратами для виконання земляних робіт на технічному етапі рекультивації	24
2.4 Технологія рекультивації сільськогосподарських земель, пошкоджених вирвами різної глибини і різного діаметру залежно від якісних характеристик ґрунтового покриву.	24
2.5 Технологія рекультивації земельних ділянок сільськогосподарського призначення, на яких були збудовані окопи, бліндажі, земляні склади для зберігання зброї і снарядів, капоніри	30
2.6 Технологія рекультивації земельних ділянок сільськогосподарського призначення за значного, високого і дуже високого рівня забруднення території	32
3. Технологічні підходи до використання ШІ та робототехніки для рекультивації земель порушених внаслідок військових дій	33
3.1 Принципи побудови інтелектуально-роботизованих систем для відновлення пошкоджених земель	33
3.2 Застосування методів комп'ютерного зору для виявлення ушкоджень та планування рекультивації	35
3.3 Застосування технологій QGIS для геоінформаційного аналізу	37
3.4 Методологія планування відновлення земель на основі цифрових та робототехнічних технологій	46
3.5 Інтеграція програмних і робототехнічних компонентів у єдиній системі рекультивації	47
ВИСНОВКИ	50
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА	52

Вступ

Рекультивація земель, пошкоджених унаслідок військових дій, є одним із ключових завдань сучасної екологічної політики та відновлення аграрного виробництва. Масштабні руйнування ґрунтового покриву, забруднення вибуховими речовинами та металами, формування техногенних вирв і траншей створюють серйозні загрози для продовольчої безпеки та сталого розвитку сільських територій. Вирішення цих проблем потребує використання новітніх науково-технічних підходів, зокрема технологій штучного інтелекту та робототехнічних систем.

Методичні рекомендації спрямовані на формування комплексної системи, що забезпечує автоматизоване виявлення ушкоджень, планування відновлювальних заходів і моніторинг процесів рекультивації. Використання безпілотних літальних апаратів, наземних роботизованих платформ та мультисенсорних систем у поєднанні з програмними засобами обробки даних дозволяє здійснювати високоточний контроль стану ґрунтів, створювати цифрові карти ушкоджень та прогнозувати ефективність відновлення.

Застосування методів комп'ютерного зору, геоінформаційного аналізу та хмарних обчислень відкриває нові можливості для оперативного управління процесами рекультивації. У поєднанні з економічним моделюванням та сценарним плануванням це забезпечує науково обґрунтовані рішення, спрямовані на відновлення продуктивності земель та їх інтеграцію у систему сталого землекористування.

Таким чином, запропоновані рекомендації поєднують у собі сучасні досягнення цифрових технологій, штучного інтелекту та робототехніки, створюючи основу для формування ефективних стратегій відновлення сільськогосподарських угідь у післявоєнний період.

Методичні рекомендації призначені для організацій та установ, що займаються відновленням сільськогосподарських угідь після військових дій. Основними завданнями є надання інструментарію для створення комплексної системи, що забезпечує впровадження автоматизованого підходу до виявлення ушкоджень, планування відновлювальних заходів та моніторингу процесу рекультивації.

1. Робототехнічні та програмні засоби для рекультивації пошкоджених земель

1.1 Використання БПЛА для моніторингу ґрунтів

У сучасних умовах стрімкого розвитку аграрного сектору та зростання вимог до ефективного управління земельними ресурсами, використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА, дронів) для дистанційного моніторингу стану ґрунту набуває особливої актуальності. Дрони є перспективним інструментом дистанційного зондування, що дозволяє оперативно, економічно та з високою точністю отримувати просторову інформацію про агроценози й ґрунтовий покрив навіть у важкодоступних чи небезпечних для людини місцях.

Завдяки оснащенню сучасними сенсорами, мультиспектральними та термальними камерами, БПЛА здатні здійснювати аерофотозйомку з роздільною здатністю до 1 см, проводити мультиспектральний аналіз, визначати вологість, структуру, вміст поживних речовин і навіть складати тривимірні моделі рельєфу та карт родючості. Це дозволяє аграріям своєчасно виявляти проблемні ділянки (ерозія, засолення, дефіцит елементів живлення), оптимізувати внесення добрив, планувати зрошення та підвищувати врожайність.

Серед ключових переваг застосування БПЛА – низькі капітальні та експлуатаційні витрати, висока мобільність, автономність, відсутність ризику для екіпажу, а також можливість охоплення великих площ за короткий час. Дрони використовуються на всіх етапах агровиробництва: від передпосівної підготовки ґрунту, контролю якості посіву, моніторингу росту культур, до аналізу стану ґрунту після збору врожаю. Дані, отримані з БПЛА, інтегруються з ГІС-системами, що дозволяє створювати цифрові карти полів і приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Основні завдання БПЛА для моніторингу ґрунту:

1) оперативний збір просторових та спектральних даних про стан ґрунту й рослинності для агротехнологічних рішень й інтеграції з системами точного землеробства;

2) вимірювання площі поля та рельєфу, визначення топографічних особливостей ділянок, створення цифрових моделей поверхні;

3) виявлення проблемних зон: пошкодження ґрунтового покриву, заболочення, засолення, ерозія, підтоплення, ділянки з дефіцитом поживних речовин чи надмірною сухістю;

4) оцінка стану рослин і ґрунту: створення карт вегетації (NDVI), моніторинг вологості, наявності бур'янів, шкідників і хвороб;

5) виявлення і моделювання зсувів, оцінка ризиків деградації ґрунтів: у тому числі на складних рельєфах, у важкодоступних місцях;

6) контроль внесення добрив, поливу та обробки полів з урахуванням просторової диференціації стану ґрунтів і культур.

Основні типи БПЛА для моніторингу ґрунту наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні типи БПЛА для моніторингу ґрунту

Тип БПЛА	Характеристики та завдання	Приклади
Мультироторні	Маневрені, утримують фіксовану точку чи висоту; придатні для точкових фото чи дрібномасштабних оглядів. Добре працюють у складних рельєфах, над лісом, горами	DJI Phantom, DJI Mavic, H520, Parrot Anafi
3 крилами (літакового типу)	Великі покриття за один виліт (до 1000–4000 га), довгий час польоту, працюють на швидкості. Головне - дальність і площа охоплення та ортофотозйомка, створення вегетаційних та рельєфних карт	Лелека-100 (DeViRo), Parrot Disco-Pro AG, Flirt (ABRIS DG), SkyHunter MD-1 (MegaDrone)
Гелікоптерного типу	Поєднують характеристики тривалого польоту й вертикального злету. Поширені в ситуаціях, де потрібна універсальність старту/посадки та велике покриття	VTOL Hawk (MegaDrone)

Особливо ефективними є мультироторні БПЛА, які завдяки своїй маневреності та гнучкості можуть здійснювати моніторинг у складних ландшафтних умовах, проводити детальні вимірювання та збирати якісні дані для аналізу й прогнозування змін у ґрунті.

Основними виробниками БПЛА для моніторингу ґрунту є:

- DJI Agriculture – глобальний лідер сегменту дронів для агро, моделі лінійки Phantom, Mavic, Matrice і спеціалізовані рішення (Multispectral, RTK).
- Parrot – відомий виробник легких дронів для агромоніторингу (Parrot Anafi, Disco-Pro AG).
- DeViRo – виробник літакового типу БПЛА «Лелека-100», заточених під великі площі, роботу в реальному часі.
- ABRIS DG – українська компанія, серія Flirt (Arrow, Cetus, Falcon, Beetle, Iron) для аерозйомки, моніторингу стану ґрунтів, створення ортофотопланів і внесення біозасобів.
- MegaDrone – виробник літаково- та VTOL-дронів для моніторингу великих полів (SkyHunter MD-1, VTOL Hawk).
- H520 (Yuneec), SenseFly (eBee X), Flyability, XAG, Agronix – глобальні та локальні виробники спеціалізованих дронів для сільського господарства й екології.

У практиці ґрунтового моніторингу ключовими основними критеріями придатності БПЛА до моніторингу ґрунту є:

- 1) спектральна інформативність (наявність ближнього ІЧ та Red Edge для індексів родючості/рослинного покриву, які часто використовують як непрямі проксі ґрунтових властивостей);
- 2) геодезична точність (RTK/PPK для стабільних багатосезонних порівнянь);

- 3) здатність до отримання високоточних моделей рельєфу (фотограмметрія з механічним затвором або LiDAR для карт ерозії/мікроформ);
- 4) радіометрична стабільність (сонячний сенсор/панелі відбиття);
- 5) операційна ефективність (час польоту, покриття, автоматизація місії).

DJI пропонує широкий спектр дронів, які умовно поділяються на споживчі (consumer), професійні (professional) та промислові/комерційні (enterprise) моделі. Основна відмінність між ними полягає у типі камер, функціоналі та сфері застосування (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Лінійка дронів DJI

Серія/ Модель	Тип камери/ сенсора	Основна роль використання
Mavic Series	4/3 CMOS Hasselblad, 5.1K HD відео	Професійна аерозйомка, кінематографія
Air Series	1" CMOS, 4K/60fps HDR	Просунута фото- та відеозйомка, тревел
Mini Series	1/1.3" CMOS, 4K/60fps, <249 г	Любительська зйомка, соцмережі, тревел
Flip	1/1.3" CMOS, 48 МП, 4K/60fps, <249 г	Компактна зйомка, соцмережі, блогінг
FPV Series	1/1.3" CMOS, 4K/120fps, 155° FOV	FPV-польоти, динамічне відео, гонки
Inspire Series	Full-Frame 8K ProRes RAW, змінні об'єктиви	Кінематографія, професійне виробництво
Matrice Series	Multi-camera: wide, tele, thermal, RTK	Інспекції, геодезія, агро, безпека

Дрони (квадрокоптери) DJI які рекомендовані до використання при моніторингу ґрунтів:

1) Mavic 3 Multispectral (рис. 1.1) – поєднує RGB-камеру 4/3" 20 МП із механічним затвором і мультииспектральний блок із чотирма монохромними каналами (Green 560 ± 16 нм; Red 650 ± 16 нм; Red-Edge 730 ± 16 нм; NIR 860 ± 26 нм). Вмонтований сенсор інцидентного світла реєструє сонячну ірадіацію для корекції даних у реконструкції 2D та нормалізації NDVI/NDRE у часі. Це робить МЗМ базовим «усе-в-одному» інструментом для регулярної діагностики зволоження верхнього шару (через теплово-вологісні контрасти рослинного покриву), просторової варіабельності органіки, контролю рекультиваційних заходів і виявлення зон ризику деградації.

2) Phantom 4 Multispectral (рис. 1.2) – інтегрує шість сенсорів (RGB + п'ять монохромних: Blue, Green, Red, Red-Edge, NIR) і має вбудований спектральний

сонячний сенсор на верхній частині планера для реальної корекції ірадіації під час польоту. За спектральним охопленням Р4М залишається корисним для навчальних і виробничих задач, однак поступається М3М за портативністю та якістю RGB (малі пікселі, нижча роздільність).



Рисунок 1.1 – Mavic 3 Multispectral
(<https://www.dji.com/global/products/enterprise?site=enterprise&from=nav>)



Рисунок 1.2 – Phantom 4 Multispectral
(<https://www.dji.com/global/products/enterprise?site=enterprise&from=nav>)

3) Mavic 3 Enterprise (M3E) / Mavic 3 Thermal (M3T)(рис. 1.3). M3E пропонує 20 МП 4/3 CMOS із механічним затвором і RTK-модулем для сантиметрового позиціювання – оптимально для високодетальної фотограмметрії рельєфу, зйомок ортофото з мінімальним «ролінг-шимом» та стабільних міжсезонних порівнянь. Термальна версія M3T додає тепловізор 640×512 (8–14 μm , точність $\pm 2^\circ\text{C}$ або $\pm 2\%$), корисний для інспекцій зрошення, пошуку витоків і картування перезволожених ділянок як непрямих індикаторів гідрологічних аномалій ґрунту. Прямого мультиспектрального каналу немає, але в задачах мікрорельєфу/ерозії й термальних аномалій цей клас надзвичайно ефективний.

4) Matrice 350 RTK (M350 RTK) як носій сенсорів (рис. 1.4). M350 RTK – найсучасніша «робоча платформа» DJI для картографії: пиловологозахищена, з підтримкою багатьох підвісів, у т.ч. Zenmuse P1 (фотограмметрія), Zenmuse L2 (LiDAR), мультисенсорні блоки H-серії та сертифіковані сторонні корисні навантаження через Payload SDK. Для моніторингу ґрунтів це дає два

принципово різні канали геометрії: високоточну фотограмметрію (P1) і лазерне сканування (L2).



M3E



M3T

Рисунок 1.3 – Mavic 3 Enterprise (M3E) / Mavic 3 Thermal (M3T)
(<https://www.dji.com/global/products/enterprise?site=enterprise&from=nav>)



Рисунок 1.4 – Matrice 350 RTK
(<https://www.dji.com/global/products/enterprise?site=enterprise&from=nav>)

Zenmuse P1 (фотограмметричний модуль) має повнокадровий сенсор 45 МП із глобальним механічним

затвором (до 1/2000 с) і підтримкою фокусних 24/35/50 мм; у типовій місії здатен покривати до $\approx 3 \text{ км}^2$ за один виліт. Для ґрунтових задач це – прецизійні DEM/DTM з дуже дрібним GSD, придатні до моделювання ерозійних процесів, мікрозападин водозатримання та побудови карт схилів/експозицій.

Zenmuse L2 (LiDAR) забезпечує діапазон повернень до 5 і точність дальномірювання $\approx 2 \text{ см}$ на 150 м; максимальна частота випромінення хмар точок – до 240 тис. т./с. LiDAR особливо цінний там, де фотограмметрія «просідає» (однорідні поверхні, відсутність текстури, низький кут Сонця), а також для стабільної відтворюваності мікрорельєфу між сезонами, що прямо впливає на оцінку ерозійної вразливості та гідрографії полів.

5) DJI Dock 2 (Matrice 3D/3TD) і Dock 3 (рис. 1.5). Dock 2 розгортає Matrice 3D (RGB-картографування) або 3TD (RGB+тепловізія) для планових автоматизованих обльотів територій. Для ґрунтового моніторингу така конфігурація підходить для високочастотних ортофото/термальних серій (напр., моніторинг вологості зрошуваних ділянок), однак вона не замінює мультиспектральні платформи в індексних задачах. У лютому 2025 р. анонсовано Dock 3 із підтримкою нових Matrice 4D/4TD (розширені індустріальні сценарії; релевантність для агро залежить від доступності місій та вимог BVLOS).



Рисунок 1.5 – DJI Dock 2 (Matrice 3D/3TD)
(<https://www.dji.com/global/products/enterprise?site=enterprise&from=nav>)

На рис. 1.6 подано схему системи на основі DJI Mavic 3 Multispectral для моніторингу стану ґрунту. Схема орієнтована на практичне застосування у польових умовах – від планування місії до отримання карти пошкоджених ділянок, вологості, індексів рослинності та зон менеджменту.

Запропонована система призначена для регулярного збору геоприв'язаних RGB- і мультиспектральних даних з метою:

- 1) оцінки просторової варіабельності ґрунтових властивостей через спектральні проксі,
- 2) виявлення пошкоджень ґрунтового покриву, зон ерозії й проблем дренажу,
- 3) формування карт зон менеджменту для організації процедури відбору ґрунтових проб (smart sampling).

Бортова конфігурація (DJI Mavic 3 Multispectral) системи базується на DJI Mavic 3 Multispectral (включно з RTK-модулем). Живлення системи – штатні акумулятори із захистом від глибокого розряду та зарядний пристрій з кількома слотами.

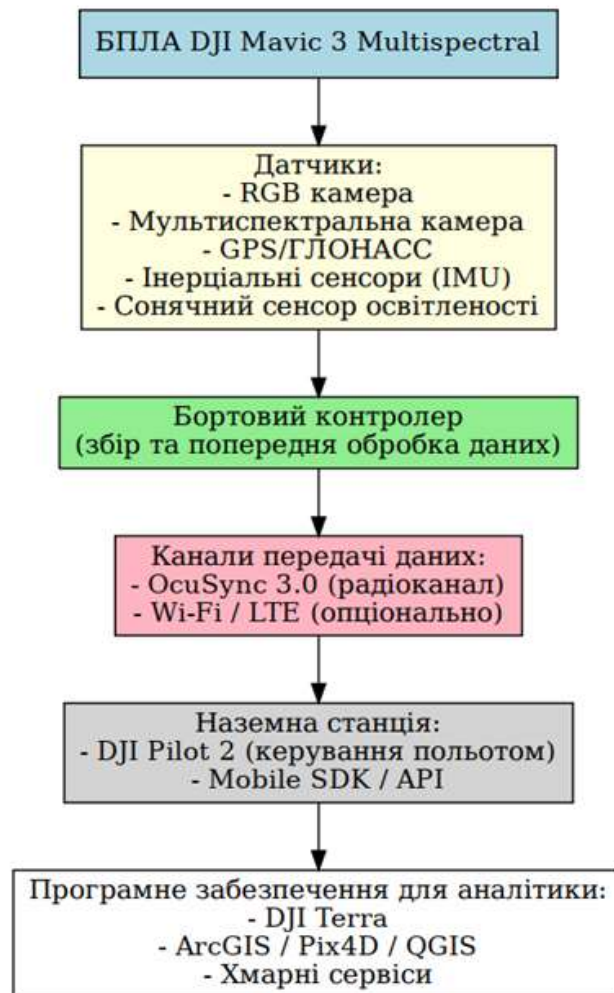


Рисунок 1.6 – Структурна схема системи моніторингу стану ґрунту на основі DJI Mavic 3 Multispectral

1.2 Наземні платформи в системах моніторингу деградованих ґрунтів

Моніторинг деградованих ґрунтів, особливо у зонах, що зазнали руйнувань унаслідок військових дій, є критично важливим для відновлення агроєкосистем та раціонального землекористування. Традиційно значну увагу приділяють

дистанційним методам, зокрема аерофотозйомці та супутниковому зондуванню. Однак такі підходи мають обмеження у точності та глибині аналізу. У цьому контексті наземні платформи посідають особливе місце, оскільки вони забезпечують високоточне локальне зондування фізичних, структурних і хімічних характеристик ґрунтів.

Наземні сенсорні комплекси дають змогу доповнити дані аероплатформ, деталізувати виявлені аномалії, а також верифікувати результати дистанційних вимірювань. Серед ключових методів, що застосовуються на наземних платформах, виділяють електромагнітну індукцію (ЕМІ), електричний опір (ERT/ERI) та фізико-хімічний аналіз. У сукупності ці методи дозволяють формувати повноцінну картину стану деградованих ґрунтів.

Наземні платформи – це роботизовані або напівавтономні системи, оснащені спеціалізованими сенсорами ближньої дії. Вони дозволяють проводити вимірювання безпосередньо на поверхні ґрунту або з контактом через електроди й зонди. Їхня роль особливо важлива у мультисенсорних системах, де вони виступають як «деталізуюча ланка» після первинної аеророзвідки.

Метод ЕМІ базується на генерації змінного магнітного поля, яке індукує вихрові струми в ґрунті. Вимірюючи вторинне поле, можна оцінити електропровідність, що залежить від вологості, засоленості, вмісту глинистих фракцій та органічної речовини.

Серед приладів, що активно застосовуються, — Geonics EM-38-MK2 Ground Conductivity Meter. Це безконтактний сенсор із передавачем і двома приймачами з міжкотушковим простором 0,5 м і 1 м. У вертикальній конфігурації він забезпечує проникність до ~1,5 м, а в горизонтальній — до ~0,75 м. Частота роботи становить 14,5 кГц, точність вимірювань $\pm 5\%$ при 30 мС/м, роздільність ~0,1 % шкали (Geonics, 2024).

Застосування ЕМІ у ґрунтознавстві добре задокументоване. Doolittle & Brevik (2014) показали, що ЕМІ дозволяє ефективно створювати карти просторової мінливості ґрунтів. De Carlo et al. (2022) використали ЕМІ для моніторингу засоленості на іригаційних землях, демонструючи високу кореляцію з лабораторними вимірюваннями. Pathirana et al. (2023) наголошують, що поєднання ЕМІ з георадаром (GPR) підвищує роздільну здатність і дозволяє аналізувати не лише провідність, а й структуру шарів ґрунту.

Методи електричного опору передбачають пропускання електричного струму через ґрунт і вимірювання потенціалу між електродами. Розподіл опору вказує на вологість, пористість і наявність ущільнених горизонтів.

Сучасним прикладом є GReTA Soil Resistivity Profiler, який автоматизує тести за методикою Wenner. Система використовує до 48 електродів, забезпечує профілювання ділянок до ~250 м завдовжки і глибиною до ~36 м. Завдяки хмарній комунікації дані можуть передаватися у режимі реального часу для постійного моніторингу (Geo-Instruments, 2024). Класична конфігурація Wenner (ASTM G57) також застосовується для аналізу шарів ґрунту, але вимагає пересування електродів після кожного виміру.

Такі системи дозволяють значно підвищити швидкість збору даних і знизити людський фактор. У майбутньому інтеграція таких платформ із дронами створить кооперативні системи «повітря-земля» для ефективного моніторингу.

Попри високу точність, наземні платформи мають низку обмежень. Найбільша проблема — мобільність у складному рельєфі та небезпечних зонах. Це особливо актуально для постконфліктних територій. Крім того, висока вартість обладнання та потреба у складних алгоритмах обробки залишаються суттєвими викликами.

Оптимізація передбачає використання комбінованого підходу: дрони для попереднього картування й виявлення аномалій, наземні роботи — для точного аналізу. Також перспективним є створення гусеничних платформ та легких сенсорів, що зменшують контакт із поверхнею.

Таблиця 1.3 – Основні методи, реалізовані на наземних платформах для моніторингу деградованих ґрунтів

Метод / Сенсор	Досліджувані параметри	Переваги	Обмеження	Типові сфери застосування
Електромагнітна індукція (EMI)	Електропровідність ґрунту, пов'язана з вологістю, засоленістю, глинистістю, органікою	Швидке безконтактне зондування; висока просторово-часова роздільність	Чутливість до зовнішніх перешкод; обмеження у складному рельєфі	Картування засоленості, зон ущільнення, прогнозування текстури ґрунту
Електричний опір (ERT / ERI)	Вологість, пористість, ущільнення, інфільтраційні властивості	Висока точність локальних вимірювань; можливість 2D/3D візуалізації	Потребує електродів та доброго контакту із ґрунтом; трудомісткість	Моніторинг вологості, структури, руху води, оцінка деградації та стабільності ґрунту
Фізико-хімічний аналіз (XRF, іон-селективні електроди, спектроскопія)	pH, солоність, концентрація металів, органічна речовина	Висока точність; можливість портативних вимірювань; оцінка токсичності	Вартість обладнання; потреба у калібруванні та лабораторному підтвердженні	Оцінка токсичності, контроль важких металів, визначення поживного потенціалу

Роботизовані наземні системи (інтегровані платформи)	Інтеграція EMI, ERT, фізико-хімічних сенсорів	Автономність, швидкість збору даних, мінімізація людського фактору	Обмежена мобільність у складному рельєфі; висока вартість	Автоматизоване картування, кооперативні системи «дрон+робот»
--	---	--	---	--

Наземні платформи є критично важливим елементом мультисенсорних систем моніторингу деградованих ґрунтів. EMI та ERT забезпечують детальне зондування фізичних характеристик, фізико-хімічні сенсори надають інформацію про склад і токсичність, а роботизовані системи інтегрують усі ці дані для створення точних карт.

1.3 Програмне забезпечення для збору, обробки та аналізу даних рекультивації

Програмне забезпечення системи моніторингу ґрунту включає (рис. 1.7):

1) Бортове ПЗ DJI Pilot 2 або RC Pro Enterprise – планування місії, параметри зйомки (AGL, перекриття, швидкість), моніторинг RTK-статусу, активація режимів безпеки, логування системних параметрів, EXIF, RTK/RINEX.

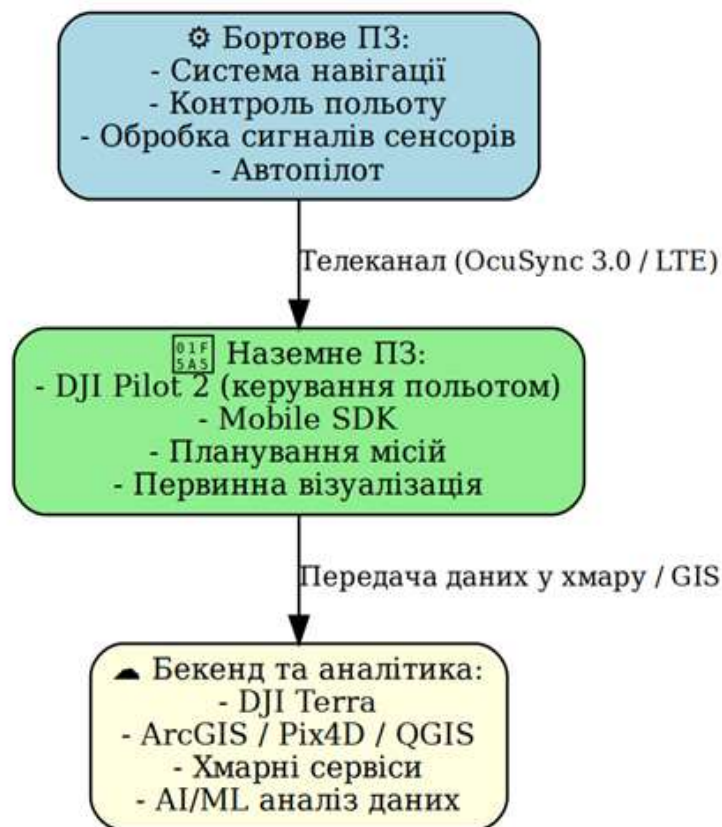


Рисунок 1.7 – Програмне забезпечення системи моніторингу ґрунту

2) Наземні інструменти (після польоту, локально):

DJI Terra (Enterprise) – первинна обробка: ортомозаїка, DEM/DTM, базова радіометрична корекція, розрахунок NDVI/NDRE.

Pix4D/Agisoft/OpenDroneMap – альтернативні конвеєри фотограмметрії з розширеними параметрами налаштування (GCP/PPK, радіометрична компенсація).

QGIS/ArcGIS – GIS-аналіз, кластеризація, побудова зон менеджменту, експорт формату GeoTIFF/GeoPackage/Shape.

3) Аналітика / ML:

Python (GDAL, rasterio, scikit-learn, xgboost) / R – побудова регресійних моделей вологості, органіки, класифікація стану ґрунту, інтеграція польових проб.

Інтеграція з FMIS/ERP через ISOXML/CSV для генерації карт-завдань VRA.

4) Хмарні сервіси (опціонально):

Зберігання та архівація даних (S3-сумісні), обробка на бекенді (наприклад, batch-обробка ортомозаїк).

API для доступу до результатів і інтеграції з агроплатформами.

DJI Terra є комплексним програмним забезпеченням для обробки даних, зібраних безпілотними літальними апаратами (БПЛА) компанії DJI, з метою створення високоточних цифрових моделей місцевості, 2D та 3D карт, а також виконання аграрної, промислової й науково-дослідної аналітики.

DJI Terra – це багатофункціональна платформа, яка поєднує інструменти для планування польотних місій, збору, обробки та аналізу даних. Вона забезпечує підтримку фотограмметрії, геопросторового моделювання та мультиспектральної аналітики, що робить її універсальним рішенням для застосування в різних сферах – від точного землеробства й екологічного моніторингу до інженерних обстежень та управління інфраструктурою.

До ключових характеристик DJI Terra належать:

1) Інтеграція з екосистемою DJI: безпосередня сумісність з більшістю професійних дронів (Phantom 4 RTK, Mavic 3 Multispectral, Matrice 300 RTK тощо), що дозволяє автоматизувати процеси від планування місії до отримання готових результатів.

2) Гнучкі інструменти планування: підтримка різних сценаріїв польотів – картографування 2D, моделювання 3D, місії з урахуванням рельєфу, а також маршрути для детального обстеження об'єктів.

3) Модулі обробки даних: можливість формувати ортомозаїки, цифрові моделі рельєфу (DEM/DTM), тривимірні сітки (mesh), щільні хмари точок, а також виконувати радіометричну корекцію для багатоспектральних знімків.

4) Аналітичні інструменти: розрахунок індексів вегетації (NDVI, NDRE, GNDVI тощо), побудова тематичних карт, зонування та кластеризація для аграрних завдань.

5) Експорт результатів у стандартні формати (GeoTIFF, LAS, OBJ, DXF, Shapefile), що забезпечує інтеграцію з іншими ГІС і CAD-системами.

6) Підтримка RTK/PPK: висока точність геоприв'язки завдяки використанню даних супутникової навігації з корекцією.

7) Масштабованість і офлайн-робота: можливість застосування як у малих проєктах (для фермерів або локальних обстежень), так і у великих корпоративних чи наукових дослідженнях із використанням GPU-обчислень.

Таким чином, DJI Terra виступає як центральний програмний комплекс у системі дистанційного зондування та аналізу даних із дронів, дозволяючи перетворювати зібрану інформацію на точні картографічні й аналітичні продукти.

Програмне забезпечення DJI Terra складається з кількох функціональних модулів (табл. 1.4), кожен з яких відповідає за окремий етап роботи з даними дронів – від планування польоту до аналітики та експорту результатів. Їхня взаємодія забезпечує завершений автоматизований цикл створення 2D/3D карт, моделей та агроаналітики.

Взаємодія між модулями DJI Terra реалізується наступним чином:

1. **Планування польоту** → користувач задає завдання, параметри покриття, тип об'єкта моніторингу та експортує політний план на дрон.
2. **Збір та імпорт даних** → дрон виконує політ автоматично за маршрутом, збирає файловий масив (фото, відео, логів), які завантажуються у DJI Terra.
3. Фотограмметричний модуль приймає дані, синхронізує просторову інформацію, автоматично генерує ортомозаїки, цифрові моделі рельєфу та 3D-реконструкції.
4. Аналітичний модуль використовує створені шари для комп'ютерного аналізу, розрахунку індексів, зонування, порівняння з польовими замірами.
5. Візуалізатор дає змогу переглянути 2D/3D-моделі, виділяти аномальні ділянки, аналізувати зміни й генерувати звіти.
6. Експорт дозволяє інтегрувати результати моніторингу в зовнішнє ГІС/агропрограмне забезпечення чи направити у техніку для автоматичного внесення добрив/ЗЗР.

Таблиця 1.4 – Основні модулі архітектури DJI Terra

Модуль	Функції та призначення
Планування польоту	Побудова маршруту (waypoints), завдання висоти польоту, GSD, налаштування перекриття знімків, експортування плану на дрон.
Збір та імпорт даних	Запуск автоматичного польоту за маршрутом, збір фото/відео/метаданих, передача файлів на ПК, збереження логів, RINEX.

Фотограмметрія (обробка)	Орторектифікація знімків, побудова ортомозаїки, щільної хмари точок, 3D моделі, DEM/DTM, первинна геоприв'язка, радіометрична корекція.
Аналітика	Розрахунок вегетаційних та індексів здоров'я (NDVI, NDRE, GNDVI, SAVI), зонування, статистика, побудова карт змін, кластеризація.
Візуалізація та звітність	Створення інтерактивних карт, перегляд цифрових моделей, формування звітів, інструментарій для аналізу результатів користувачем.
Експорт даних	Генерація GeoTIFF, 3D-моделей (.obj, .ply), Shape-файлів, CSV, ISOXML для агротехніки або завантаження у GIS/системи управління фермою.

Усі модулі працюють узгоджено, забезпечуючи безшовну передачу даних і повний цикл – від польоту до прийняття агротехнологічних рішень, картографії та наукової аналітики.

Сучасний моніторинг деградованих ґрунтів, особливо у постконфліктних регіонах, потребує поєднання масштабності дистанційного зондування та високої точності наземних сенсорних вимірювань. У цьому контексті дедалі більшої уваги набувають кооперативні системи, у яких безпілотні літальні апарати працюють у взаємодії з наземними роботизованими платформами. Ключовим чинником ефективності таких систем є програмне забезпечення, яке забезпечує не лише збір даних, але й їх синхронізацію, інтеграцію та подальшу візуалізацію.

На початковому етапі дрони, оснащені мультиспектральними камерами RedEdge, Sentera чи Parrot Sequoia, здійснюють первинне картування території. Зібрані знімки обробляються у середовищі Pix4Dfields, де виконується автоматична калібровка з урахуванням умов освітлення, формується ортомозаїка у форматі GeoTIFF та розраховуються спектральні індекси NDVI чи VARI. Результатом цього етапу є базова карта аномалій, яка визначає потенційно деградовані ділянки, що потребують додаткового дослідження.

Наступний етап передбачає роботу наземних роботів, обладнаних сенсорами електричного опору або електромагнітної індукції. Отримані числові ряди даних у форматах CSV або SHP інтегруються в хмарне середовище DroneDeploy із використанням плагіна SoilMapper. Це дозволяє сформувати комбіновану карту, де спектральні характеристики, зафіксовані дроном, деталізуються локальними показниками вологості та провідності ґрунтів.

Для забезпечення координації у режимі реального часу застосовується Robot Operating System, що організовує роботу дронів і наземних платформ як окремих вузлів, синхронізованих через центральний master-node. Потoki даних зберігаються у форматі ROSbag зі швидкістю до 50 МБ/с, що дає змогу

оперативно коригувати маршрути: у разі виявлення нової аномалії дроном наземний робот отримує команду змінити траєкторію і провести додаткові вимірювання.

Завершальна інтеграція здійснюється у геоінформаційних системах, серед яких провідне місце займає QGIS. Це середовище підтримує імпортування даних із Pix4D, DroneDeploy та ROS, а також дозволяє поєднувати їх із глобальними картами, наданими SoilGrids API, що мають роздільність 250 метрів. Використання алгоритмів просторової інтерполяції, зокрема IDW та kriging, забезпечує створення багатошарової карти з поєднанням регіональних трендів і локальних уточнень. Експорт результатів у форматах GeoTIFF, KMZ чи SHP робить можливим подальше використання карт у середовищах Google Earth або ArcGIS. У результаті кінцеві користувачі отримують інтерактивний інструмент аналізу деградованих ґрунтів, який враховує як великомасштабні закономірності, так і локальні особливості.

Паралельно із кооперативними платформами розвивається напрям мультисенсорних комплексів, що інтегрують спектральні, фізичні та хімічні дані, потребуючи значних обчислювальних ресурсів. До таких систем належить Agisoft Metashape, здатний обробляти до 50 тисяч фотографій у межах одного проєкту, включно з мультиспектральними й тепловими. Завдяки алгоритмам Structure-from-Motion і Multi-View Stereo цей програмний продукт формує тривимірні моделі ґрунтових структур із подальшим експортом у формати LAS/LAZ, GeoTIFF чи OBJ. Іншим прикладом є ENVI від Harris Geospatial, який має понад 50 вбудованих спектральних індексів, включно з водним та хлорофільним, і підтримує роботу з гіперспектральними наборами даних до 400 каналів, використовуючи GPU-обчислення для прискорення класифікації.

Важливим інструментом для інтеграції польових вимірювань є ArcGIS Pro із модулем Spatial Analyst, що дозволяє поєднувати дані XRF-аналізаторів, іон-селективних електродів і мультиспектральних камер. Наявні у середовищі інструменти геостатистики, зокрема kriging і cokriging, застосовуються для побудови прогностичних карт деградації ґрунтів. Наукові прототипи часто використовують бібліотеки OpenCV у поєднанні з TensorFlow: CNN-класифікатори в режимі реального часу обробляють потоки мультиспектральних зображень зі швидкістю до 30 кадрів на секунду, дозволяючи виявляти локальні аномалії. У практичному агроекологічному застосуванні поширеним є AgroSense, інтегрована платформа, що підтримує роботу із сенсорами вологості Decagon і Sentek, мультиспектральними камерами та метеостанціями. Вона має зручний веб-інтерфейс і дає змогу агрономам прогнозувати врожайність та моделювати сценарії рекультиваційних заходів.

Мультисенсорні програмні комплекси забезпечують повноцінний цикл від збору сигналів до створення прогностичних моделей і формують основу для комплексних екологічних систем. Їх використання у поєднанні з кооперативними підходами відкриває перспективу створення багаторівневих платформ, які здатні забезпечити детальний аналіз деградованих ґрунтів та підтримати прийняття управлінських рішень у відновленні агроecosистем.

На підставі проведеного аналізу технічних і програмних рішень для моніторингу та відновлення сільськогосподарських земель, деградованих унаслідок військових дій, доцільним є застосування інтегрованого підходу, що поєднує супутникове зондування Землі, використання безпілотних літальних апаратів, наземних роботизованих платформ, комбінованих мультисенсорних систем та спеціалізованого програмного забезпечення.

Застосування безпілотних літальних апаратів забезпечує можливість швидкого та гнучкого аерофотознімального моніторингу територій, які зазнали техногенного та військового навантаження. Використання мульти- і гіперспектральних сенсорів дозволяє визначати ділянки забруднення, порушення ґрунтового профілю, зниження біологічної активності та інші ознаки деградації.

Супутникове зондування Землі надає можливість отримувати інформацію про великі території, що постраждали від бойових дій, із забезпеченням багатоспектрального аналізу та відстеженням довгострокових змін у стані ґрунтового покриву. Завдяки супутниковим даним стає можливим виділення зон суцільної деградації, оцінка масштабів ураження та визначення пріоритетних ділянок для проведення відновлювальних заходів.

Наземні роботизовані платформи мають особливе значення для локальних досліджень у районах із високим рівнем небезпеки (наявність мін, нерозірваних боєприпасів чи токсичних залишків). Вони дозволяють проводити високоточні вимірювання фізико-хімічних параметрів ґрунту без безпосередньої присутності дослідників, що значно підвищує безпеку виконання робіт.

Комбіновані системи, які інтегрують супутникові, аерофотознімальні та наземні дані, забезпечують створення багаторівневої інформаційної моделі деградованих ґрунтів. Поєднання різних джерел інформації дозволяє оцінити не лише масштаб, але й інтенсивність змін, викликаних військовим впливом, а також сформулювати рекомендації щодо оптимальних методів рекультивації та агротехнічних заходів.

Важливою складовою є спеціалізоване програмне забезпечення, здатне інтегрувати супутникові, безпілотних літальних апаратів та наземні дані, здійснювати їх багаторівневу обробку, застосовувати алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту для виявлення закономірностей деградації й прогнозування ефективності відновлювальних заходів.

Окремої уваги заслуговує питання безпеки проведення досліджень. В умовах післявоєнних територій наявна значна мінна небезпека, залишки боєприпасів, токсичні речовини та важкі метали, що створюють ризики для персоналу. Тому вибір технічного забезпечення базується не лише на вимогах до точності чи масштабності моніторингу, але й на критеріях безпеки: пріоритет надається дистанційним методам спостереження, роботизованим платформам та безпілотним системам, які мінімізують потребу безпосередньої присутності дослідників у небезпечних зонах.

Таким чином, у процесі відновлення ґрунтів, деградованих унаслідок військових дій, вибір технічного забезпечення ґрунтується на комплексному використанні супутникового зондування, безпілотних літальних апаратів,

наземних роботизованих платформ та мультисенсорних систем у поєднанні з програмним забезпеченням. Саме такий підхід забезпечує комплексність моніторингу, достовірність діагностики, науково обґрунтованість відновлювальних заходів і, що особливо важливо, безпеку виконання робіт.

1.4 Технології класифікації вирв і визначення їх параметрів

Підготовчим етапом до оцінки ресурсів для рекультивації і відповідно компонентом системи є оцінка обсягу ґрунту, необхідного для відновлення деградованих територій. Для цього запропоновано використовувати геометричні формули виходячи із гіпотези, що типовою формою кратеру буде усічений конус.

Для візуалізації масштабів проблеми, доцільним та ефективним є створення комплексної карти деградації земель, яка включає накладання виявлених кратерів на супутникові зображення за допомогою ГІС-інструментів, таких як QGIS, ArcGIS. Базові аспекти подібної роботи окреслені в публікації [3] і можуть стати основою для подальшого дослідження.

Наступний із запропонованих етапів – оцінка ресурсів для рекультивації. Цей етап фокусується на оцінці обсягів ресурсів, необхідних для ефективного відновлення навколишнього середовища. Така оцінка базується на аналізі історичних даних про типи ґрунтів, потреби рослинності та кліматичні умови.

Для забезпечення ефективної реалізації відновлювальних заходів, пропонується розробка детального логістичного плану, який включає в себе задачі із визначення логістичних центрів, транспортування матеріалів, до центрів та розподіл в межах кожного центру (рис. 1.8).

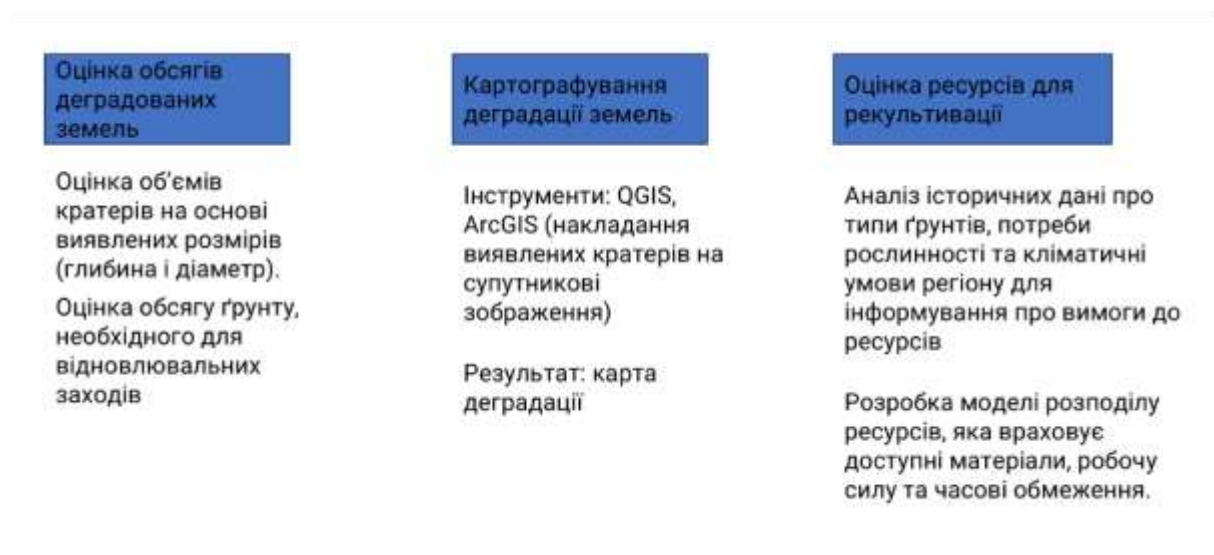


Рисунок 1.8 – Етапи оцінки ресурсів для рекультивації деградованих територій

Кратери (вирви від вибухових снарядів) визначають як полігони круглої або овальної форми, які пізніше трансформувалися в точки (центроїди) для потреб візуалізації. Враховуючи те, що кут схилу від надиру відрізняється на

різних космічних знімках, тому застосовували відповідну поправку для визначення точного місцезнаходження кожної вирви. Діаметр кратерів розраховували на основі площі полігонів.

Згідно з опублікованими даними між діаметром кратерів та типом (калібром) зброї для суглинкових ґрунтів існує пряма залежність (Побережна і Станецький, 2017; Прохоров-Лукін та ін., 2007). Як свідчать лабораторні експерименти, у пісках глибина кратерів дорівнює половині їх радіуса (Mazur et al., 2022), однак навіть ретельно виконані експерименти та оцінки можуть давати відхилення від норми до 10–30 % (Ambrosini and Luccioni, 2005).

Об'єм переміщених ґрунтів (об'єм первинного кратера) розраховано відповідно до двох різних підходів, запропонованих у праці Strange and Rooke (1988). Саме тому об'єм переміщеного ґрунту представлено у вигляді діапазону значень:

$$V_1 = 0,45 (\pi r^2 h), \quad (1.1)$$

де V_1 – об'єм переміщеного ґрунту, м^3 ;

r – радіус кратера, м;

h – глибина кратера, м.

Друга формула дає можливість розрахувати об'єм переміщеного ґрунту на основі відомої маси заряду боєприпасу:

$$V_2 = W^{0,87}, \quad (1.2)$$

де V_2 – об'єм переміщеного ґрунту, м^3 ;

W – маса заряду боєприпасу.

Bonchkovskyi et al., 2023 і Балюка та ін., 2024 було визначено дві принципові зони навколо кратерів, які репрезентують різний вплив боєприпасів на ґрунтовий покрив:

1) зона бомбтурбації;

2) зона забруднення.

Діаметр зон бомбтурбації навколо кратерів у суглинкових ґрунтах представлено у табл. 1.5. за даними Bonchkovskyi et al., 2023.

Таблиця 1.5 – Середній діаметр зони бомбтурбації у суглинкових ґрунтах (Балюка та ін., 2024)

Діаметр кратера, м	Вірогідний калібр зброї, мм	Середній діаметр зони бомбтурбації, м
Менше 1	82, 76, 85, 100	3
1–2	82, 76, 85, 100	6
2–3	82, 76, 85, 100, 120, 122	8
3–4	120, 122	9
4–5	152, 140, 160	12
5–6	152, 140, 160	15
6–7	203, 220, 240	18

7–10	203, 220, 240, 300, авіаційні бомби	25
Понад 10	Авіаційні бомби	30 і більше

Bonchkovskyi et al., 2023 показали помірну кореляцію ($r=0,51$) між діаметром зони бомбтурбації та діаметром кратера (точніше калібром та типом боєприпасу). Ця залежність є основою визначення зон бомбтурбації навколо кратерів, для яких вони не були ідентифіковані.

Зона забруднення (засмічення) – це ділянка більшої площі навколо кратера, яка переважно не зазнала фізичних порушень, однак є вірогідно забрудненою вибуховими речовинами, уламками боєприпасів та бомб (Bonchkovskyi et al., 2023) і представлена в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Середній оціночний діаметр зони забруднення Bonchkovskyi et al., 2023

Оціночний калібр зброї, мм	Середній діаметр зони забруднення, м
82, 76, 85, 100	20
120, 122	30
152, 140, 160	50
203, 220, 240	70
Авіаційні бомби	100

2 Сценарії рекультивації сільськогосподарських земель, пошкоджених вирвами різної глибини та діаметру залежно від якісних характеристик ґрунту

2.1 Вимоги до рекультивованих земельних ділянок сільськогосподарського призначення, пошкоджених воєнними діями

Головними вимогами до рекультивованих земельних ділянок сільськогосподарського призначення, порушених воєнними діями є виконання комплексу заходів, спрямованих на зменшення неоднорідності (строкатості) параметрів ґрунтового покриву. Це забезпечується за рахунок підбору субстратів з подібними параметрами. Вибір видів робіт із вертикального планування ґрунтового профілю залежить від розмірів порушеної поверхні, а також від фізико-біологічних властивостей ґрунтів.

Параметри субстратів, які використовуються для створення техноземних конструкцій (гумусованість, гранулометричний склад, реакція ґрунтового середовища, забезпеченість доступними рослинам елементами живлення, ступенем засолення і осолонцювання та ін.) повинні відрізнятись не більше, ніж на 10%.

Не менш важливим чинником успішності рекультивації є заходи із запобігання локального просідання відновлених земельних ділянок. Рельєф і

форма рекультивованих ділянок повинні забезпечувати їх ефективне господарче використання. Рельєф і експозиція схилів є основними чинниками, що обумовлюють мікроклімат порушеної території. Період часу, необхідний для самоущільнення різноманітних видів насипних ґрунтів і досягнення рівноважної щільності складення, становлять: для насипних ґрунтів піщаного і супіщаного гранулометричного складу – до двох років; для суглинкових – 2-3 роки; для глинистих субстратів – 4-5 років. Тому необхідно виконувати роботи з планування поверхні ґрунтового покриву щорічно впродовж вказаного періоду. Залежно від обсягів робіт такі планування виконуються як типовими сільськогосподарськими агрегатами – різноманітними боронами, культиваторами, так і спеціальним обладнанням – планувальниками, бульдозерами, грейдерами.

2.2 Вимоги до якісних характеристик субстратів, що використовується для формування техноземних конструкцій

Основні критерії при встановленні потужності гумусованого шару ґрунту, що рекомендовано для нанесення - це рівень родючості ґрунтової суміші, що утворюється при змішуванні генетичних горизонтів. Бонітет такої суміші не повинен відрізнятися від ґрунту на поряд розташованих непорушених ділянках на показник, який не перевищує 10%. Рівень родючості відновленого ґрунту повинен відповідати вимогам сільськогосподарських культур, які вирощуються у конкретній природно-кліматичній зоні.

Для обґрунтування параметрів потужності гумусованого шару, що підлягає зняттю, використовують такі показники:

- вміст гумусу (%), за ДСТУ 4289:2004, по нижчій межі гумусованого шару повинен складати не менше 1; для районів розповсюдження ґрунтів з низьким вмістом гумусу - дерново-підзолистих, дернових і інших нижня межа вмісту гумусу встановлюється в кожному конкретному випадку;
- величина рН водної витяжки для чорноземів та каштанових ґрунтів, за ГОСТ 26423 повинна складати 5,5-8,2;
- величина рН сольової витяжки за ГОСТ 26483 для дерново-підзолистих, ясно-сірих, сірих, темно-сірих ґрунтів та чорноземів опідзолених повинна складати не менше 4,5;
- вміст обмінного (рухомого) алюмінію (мг/100 г), за ГОСТ 26485, при рН сол. < 5 повинен складати не більше 3;
- масова доля обмінного натрію (%), від ємності катіонного обміну, повинна складати: в суміші родючого шару чорноземів, темно-каштанових, каштанових ґрунтів в комплексах із солонцями - не більше 5; визначення обмінного натрію проводиться за ММВ 31-497058-007-2005.
- масова доля водорозчинних токсичних солей у гумусованому шарі ґрунту не повинна перевищувати 0,25 % від маси ґрунту; вимірювання та розрахунок суми токсичних солей проводиться згідно ГОСТ 17.5.4.02;
- вміст фракцій гранулометричного складу менше 0,01 мм, за ММВ 31-497058-010-2003, повинен бути в межах 10(15)-65 %;

- вміст CaCO_3 повинен бути не більше 30 %; визначення CaCO_3 ., проводять при $\text{pH}_{\text{вод.}} > 7,0$ за ММВ 31-497058-021-2005;
- вміст $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ у солянокислій витяжці, %, за ДСТУ 150 11048:2001, повинен складати не більше 10.

Гумусований шар ґрунту, який підлягає зняттю, не повинен містити: радіоактивних елементів, важких металів, залишкових кількостей пестицидів та інших токсичних речовин, що перевищують нормативні рівні для цих речовин.

За дефіциту гумусованої ґрунтової маси можливе використання субстратів потенційно родючих гірських порід. Такі субстрати повинні відповідати вимогам ДСТУ 7906:2015 «Захист довкілля. Придатність розкривних та вміщувальних гірських порід для біологічної рекультивації земель. Класифікація». Основними параметрами для визначення їх придатності є показники гранулометричного складу і ґрунтово-геологічна характеристика, показники хімічного складу (реакція середовища, засоленість, кількість гіпсу, карбонатів, поглинутого натрію в ГВК, вміст рухомого алюмінію, важких металів та радіоактивних елементів).

2.3 Джерела забезпечення субстратами для виконання земляних робіт на технічному етапі рекультивації

Для рекультивації вирв різного діаметру і глибини необхідна певна кількість субстратів. Найбільш поширеним субстратом є гумусована ґрунтова маса, яку відбирають з непорушеної земельної ділянки, що безпосередньо межує з вирвами. Якщо глибина вирви перевищує глибину ґрунтового профілю (до порушення), доцільно використовувати матеріал, подібний до материнської породи.

У процесі рекультивації вирв можливо використовувати для формування підстилаючої основи (нижньої частини негумусованої товщі ґрунтової конструкції) й інші субстрати – полідисперсні нефітотоксичні матеріали природного або штучного походження з подібними фізичними параметрами, насамперед за дисперсністю (допустиме відхилення $\pm 10\%$ за вмістом фракції «фізичної глини»).

2.4 Технологія рекультивації сільськогосподарських земель, пошкоджених вирвами різної глибини та діаметру залежно від якісних характеристик ґрунтового покриття

Усі кратери (вирви) умовно за розміром у діаметрі можливо поділити на 3 групи: маленькі (до 3 метрів), середні (3,1-5 м), і великі більші ніж 5,1 м. Маленькі кратери до 3,1 м у діаметрі можуть розрівнюватись грейдерами або спеціальною технікою, а середні і великі підлягають рекультивації. Роботи з рекультивації виконують згідно з робочими проектами землеустрою щодо рекультивації порушених земель із визначенням основних проектних рішень, виконання яких забезпечує ефективне використання рекультивованих ділянок, встановлення обсягів, технології та черговості проведення відновлювальних

робіт, визначення кошторисної вартості рекультивації (Правила розроблення робочих проектів землеустрою, 2022). Рекультивація ґрунтового покриття, порушеного внаслідок воєнних дій, здійснюється лише після розмінування земельних ділянок, видалення уламків і залишків воєнної техніки і інших включень мілітарного характеру. Для реалізації проекту з рекультивації конкретного об'єкту і початку виконання робіт необхідно отримати відповідний дозвіл від ДСНС.

Розробку проектів рекультивації порушених земель здійснюють на основі діючих екологічних, санітарно-гігієнічних, будівельних та інших нормативних документів і національних стандартів з урахуванням природно-кліматичних умов, місця розташування об'єкта рекультивації, думки власника ділянки та акту обстеження порушеної земельної ділянки для узгодження проектних рішень по рекультивації із зацікавленими сторонами.

При розробці проектів рекультивації мілітарно порушеної земельної ділянки приймають до уваги такі характеристики:

- природні умови району (кліматичні, літологічні, орографічні і ін.);
- масштаб і характер порушених земель, виявлених в результаті проведеного обстеження земель та земельних ділянок;
- територіальні схеми і генеральні плани розвитку територій;
- фактичний і прогнозований стан порушених земель до моменту рекультивації (площі, форми техногенного рельєфу, ступеня природного заростання, наявність заскладованої гумусованої маси ґрунтів і потенціал їх родючості, ерозійні процеси, ступінь забруднення ґрунту);
- показники хімічного і гранулометричного складу, агрохімічних і агрофізичних властивостей, інженерно-геологічної характеристики розкривних і вміщуючих порід і їх сумішок у відвалах відповідно до вимог ДСТУ 7906:2015 «Захист довкілля. Придатність розкривних та вміщувальних гірських порід для біологічної рекультивації земель. Класифікація»;
- господарські, соціально-економічні та санітарно-гігієнічні умови району розміщення порушених земель;
- термін використання рекультивованих земель з урахуванням можливості повторних порушень;
- оцінка впливу на навколишнє середовище процесу рекультивації порушених земель;
- збереження і відновлення біорізноманіття;
- екологічні, санітарно-гігієнічні, будівельні, водогосподарські, лісгосподарські та інші нормативи і стандарти;
- плановане цільове призначення і дозволене використання земель та земельних ділянок після їх рекультивації.

Виконання проектних робіт здійснюють з урахуванням видів порушень, щільності поширення на земельній ділянці, їхньої якісної характеристики, особливостей місцевих умов, тривалості проведення робіт із відновлення ґрунтів, прийнятого напрямку подальшого використання.

Весь комплекс робіт з рекультивації порушених земельних ділянок, згідно проекту, передбачається проведення підготовчого, технічного та біологічного етапів.

На підготовчому етапі виконують такі роботи:

- аналіз матеріалів дистанційного зондування території земельної ділянки (за необхідності і наявності) для виявлення негативних явищ і кризових ділянок;
- польові обстеження з відбором ґрунтових проб для лабораторно-аналітичних досліджень щодо визначення агрохімічних, фізико-хімічних, фізичних властивостей ґрунтів;
- обґрунтування, планування заходів щодо проведення технічного та біологічного етапів рекультивації.
- розробка проектної документації рекультивації земельної ділянки.

Інженерно-технічна рекультивація (технічний етап) передбачає проведення комплексу робіт, спрямованих на підготовку відновлення зруйнованих воєнними діями ділянок територій після завершення бойових дій, які призвели до локального порушення земної поверхні, з метою їх подальшого використання.

На технічному етапі здійснюють підготовку пошкодженої земельної ділянки для подальшого використання шляхом пошарового нанесення в об'єкти рекультивації (вирви, траншеї, бліндажі, інші воєнно-інженерні об'єкти) відповідного шару ґрунтової маси і материнської породи в порядку, який забезпечує найвищу продуктивність відновлюваного ґрунту, дотримуючись послідовності та строків їхнього укладання, що забезпечить мінімальні процеси усадки, зокрема створення капілярно-перериваючих екранів із потенційно родючих порід у разі наявності в ґрунтовій масі та/або материнській породі токсичних сполук; вирівнювання поверхні рекультивованих ґрунтів; проведення, в разі потреби, протиерозійних, гідромеліоративних і культуртехнічних заходів.

На територіях, порушених у результаті ведення воєнних дій, інженерно-технічна рекультивація передбачає:

- інженерно-технічні заходи з підготовки порушеної території: здійснюють підведення і створення необхідних комунікацій і технічних засобів, облаштовують тимчасові і постійні дороги, за необхідності – будівництво гідротехнічних і інших об'єктів;
- пошук об'єктів для видобутку гумусованої маси ґрунту, за необхідності – облаштування майданчиків для її складування і зберігання;
- вибір технології і технічних засобів для нанесення на підготовлену для рекультивації земельну ділянку;
- транспортування, складування і зберігання гумусованої маси ґрунту у тимчасово створених «земляних» складах (буртах або відвалах);
- за необхідності (за дефіциту гумусованої ґрунтової маси) – розробляння, транспортування, складування і зберігання потенційно родючих розкритих гірських порід і/або порід з меліоративними властивостями (мергельні, карбонатні, гіпсові геологічні відклади).

- формування геометрії товщі (тіла) техноземного ґрунту з виконанням робіт для виположування укосів вирв і виїмок;
- формування рельєфу земельної ділянки залежно від подальшого цільового використання. Грубе, чистове і повторне планування поверхні;
- стабілізацію поверхні земельної ділянки, на якій здійснювали рекультиваційні роботи з нанесення шару ґрунту чи породи. Тривалість періоду стабілізації рекультивованої ділянки залежить від: глибини порушеної товщі; способу формування тіла техноземного ґрунту; характеристик ґрунтової маси (усадочність, гранулометричний склад, переущільнення). За відсутності необхідної кількості гумусованої ґрунтової маси використовують нефітотоксичні полімінеральні полідисперсні осадові гірські породи, якими засипають вирви, траншеї і інші порушені ділянки.
- ліквідацію наслідків осідання поверхні шляхом здійснення чистових планувань рекультивованої земельної ділянки у пострекультиваційний стабілізаційний період з метою запобігання формування небажаних форм неорельєфу, насамперед, локальних просідань поверхні з утворенням «блюдець»;
- вибір і формування універсальної або спеціальних моделей техноземних ґрунтових тіл залежно від подальшого цільового використання рекультивованих ділянок;
- комплекс меліоративних заходів, спрямованих на поліпшення хімічних і фізичних властивостей ґрунтів рекультивованих ділянок, з яких складається поверхневий шар рекультивованих земель (за необхідності).

Деталізований набір робіт і терміни їх виконання встановлюються робочим проектом рекультивації земельної ділянки відповідно до майбутнього цільового використання.

Роботи на технічному етапу рекультивації проводять у теплий сухий період року.

Найбільш розповсюдженим об'єктом рекультивації у зоні бомботурбації є вирви (кратери) від вибухів снарядів, бомб і ін. зброї, а також прилеглі до них площі, перекриті виверженим матеріалом. Вирви можуть бути різної форми, глибини, діаметру, об'єму. Їх рекультивація здійснюється шляхом засипання об'єму вирви субстратами, розташованими насамперед безпосередньо у зоні бомботурбації. Це ділянки, поверхня якої сформована виверженим матеріалом гумусованої ґрунтової маси і (у разі значних глибин) субстратом з материнської гірської породи.

Технологія рекультивації вирв залежить насамперед від їх глибини. Так, вирви глибиною, що не перевищує межі гумусованого профілю, засипають гумусованою ґрунтовою масою з території, яка безпосередньо знаходиться поряд з вирвою. Так, для заповнення 1 м³ вирви достатньо зняти (перемістити) шар ґрунту у 2–3 см з прилеглої до кратеру площі у 30–50 м².

Вирви, глибина яких перевищує межі гумусованого профілю, рекультивують у два етапи. Спочатку дно вирви засипають субстратом, подібним до материнської породи. Як правило, це потенційно родючі гірські породи згідно ДСТУ 7906:2015. Можливе й використання інших нефітотоксичних дисперсних

матеріалів природного або штучного походження з подібними фізичними параметрами, насамперед за дисперсністю (допустиме відхилення $\pm 10\%$ за вмістом фракції «фізичної глини»), які відповідають вимогам до субстратів-грунтозамінників.

Верхньою межею відсипки цим субстратом є нижня відмітка гумусованого профілю ґрунту у непорушеному стані. Верхня частина профілю відновлюваного ґрунтового тіла формується з ґрунтової маси, яку використовують з прилеглої території, знімаючи шар не більше 3 см. Для заповнення кожного 1 м³ вирви необхідно перемістити ґрунтову масу з 30-50 м² площі. Цей субстрат складається як з гумусованої ґрунтової маси верхнього горизонту профілю ґрунту, так і з ґрунтової суміші, яка була вивержена і переміщена у результаті бомботурбації. Таке «скальпування» неушкодженого ґрунту суттєво не вплине на рівень його родючості і за виконання відповідних фітомеліоративних і агрохімічних заходів досить швидко оптимізує ґрунтові режими і властивості.

Метою біологічного етапу рекультивації земельних ділянок, ушкоджених бомботурбаціями, є оптимізація властивостей і режимів ґрунту для забезпечення відповідних умов для вирощування відповідного асортименту сільськогосподарських культур з вираженими ґрунтополіпшувачими фітомеліоративними можливостями, застосуванням підвищених норм органічних, мінеральних і бактеріальних добрив, а також сидерації.

Особливості рекультивації земельних ділянок, ушкоджених бомботурбаціями у різних природно-кліматичних зонах України.

Технологія рекультивації ушкоджених земельних ділянок суттєво розрізняється у різних природних зонах України. Насамперед це пов'язано з якісними характеристиками ґрунтового покриву, особливостями клімату, асортиментом сільськогосподарських культур, елементами їх агротехнологій і ін. чинниками.

У зоні бойових дій на Поліссі (Житомирська, Київська, Чернігівська області) переважають ґрунти підзолистого генезису з неглибоким ґрунтовым профілем, переважно легким гранулометричним складом, низькими запасами гумусу і біофільних елементів, кислою реакцією середовища, низьким бонітетом, специфічним асортиментом сільськогосподарських культур. Рекультивація земельних ділянок, пошкоджених бомботурбаціями з утворенням вирв передбачає їх засипання ґрунтовым матеріалом, відібраним з поряд розташованими ділянками. Враховуючи низьку гумусованість ґрунтової маси непорушених земель, глибина зрізання для отримання субстрату не повинна перевищувати 2 см. Тобто, на заповнення 1 м³ об'єму необхідно зняття ґрунтової маси з площі не менше 50 м². На біологічному етапі для оптимізації ґрунтових характеристик вирощують фітомеліоративні культури (багаторічні бобові трави, сидерацію), вносять органічні і мінеральні добрива у підвищених нормах на 25-30%. Враховуючи низьку усадочність насипних субстратів з піщаних і супіщаних ґрунтів, достатньо 1-2 планувань поверхні рекультивованих земельних ділянок впродовж наступних 2 років.

У Лісостеповій зоні (Сумська, Харківська області) переважають високородючі чорноземні ґрунти (переважно чорноземи типові) з глибоким

гумусованим ґрунтовим профілем, високим вмістом гумусу і біофільних елементів, нейтральною реакцією ґрунтового середовища, високою ємністю поглинання, переважно суглинковим гранулометричним складом, високим балом бонітету. Рекультивація сільськогосподарських угідь, пошкоджених бомботурбаціями залежить від глибини утворених вирв. Якщо глибина вирви не перевищує глибину гумусованого профілю, такі вирви заповнюють гумусованою ґрунтовою масою, відібраною з поряд розташованими ділянками. Такі субстрати мають у своєму складі як матеріал, вивержений у результаті бомботурбації, так і з верхнього шару неушкодженого ґрунту. Для рекультивації використовують субстрати з поверхні прилеглої до вирви території. Враховуючи значну глибину гумусованого профілю чорноземних ґрунтів, глибина зрізання для отримання субстрату може складати 4-5 см. Тобто, для заповнення об'єму вирви 1 м³ достатньо площі 20-25 м².

Глибокі вирви, у яких пошкоджено не лише весь гумусований профіль, а й підстилаюча основа, складена материнською породою, рекультивують у два прийоми. Спочатку днище ями засипають субстратом потенційно родючої гірської породи, подібної до підстилаючої материнської породи, якість якої повинна відповідати ДСТУ 7906:2015. Потім їх засипають на 5 см вище рівня поверхні гумусованим матеріалом, відібраним з поряд розташованими ділянками і ущільнюють котками. Глибина зрізання ґрунту для отримання субстрату може складати 4-5 см. Тобто, для заповнення об'єму вирви 1 м³ достатньо площі 20-25 м².

На біологічному етапі для оптимізації ґрунтових характеристик вирощують культури з фітомеліоративними якостями (багаторічні бобові трави, злаково-бобові травосумішки, сидерати), підвищені на 25-30 % норми органічних і мінеральних добрив. Для активізації біологічних процесів здійснюють бактеризацію мікробіологічними препаратами.

У *Степу України* (Луганська, Донецька, Запорізька, Дніпропетровська, Херсонська, Миколаївська, Одеська області) переважають чорноземні ґрунти (переважно чорноземи звичайні і чорноземи південні) з глибоким гумусованим ґрунтовим профілем (60-70 см), досить високим вмістом гумусу (3-4%) і біофільних елементів, нейтральною і слабо лужною реакцією ґрунтового середовища, досить високою ємністю поглинання, переважно суглинковим і легкоглинистим гранулометричним складом, досить високим балом бонітету. Як і Лісостеповій зоні, технологія рекультивації угідь, пошкоджених бомботурбаціями залежить від глибини утворених вирв. Якщо глибина вирви не перевищує глибину гумусованого профілю, такі вирви заповнюють гумусованою ґрунтовою масою, відібраною з поряд розташованими ділянками. Такі субстрати складаються як з матеріалу, виверженого при бомботурбаціях, так і з верхнього гумусованого шару неушкодженого ґрунту. Для рекультивації використовують субстрати з поверхні прилеглої до вирви території. Враховуючи досить потужну глибину гумусованого профілю чорноземних ґрунтів, глибина зрізання для отримання субстрату може складати 3-5 см (5-8% від глибини гумусованого профілю). Тобто, для заповнення об'єму вирви 1 м³ достатньо матеріалу з площі 20-30 м².

Глибокі вирви, у яких пошкоджено не лише весь гумусований профіль, а й підстилаюча основа, складена материнською породою, рекультивують у два прийоми. Спочатку днище ями засипають субстратом потенційно родючої гірської породи, подібної до підстилаючої материнської породи, якість якої повинна відповідати ДСТУ 7906:2015. Потім їх засипають на 5 см вище рівня поверхні гумусованим матеріалом, відібраним з поряд розташованими ділянками і ущільнюють котками. Глибина зрізання ґрунту для отримання субстрату може складати 3-5 см. Тобто, для заповнення об'єму вирви 1 м³ достатньо площі 20-30 м².

На біологічному етапі для оптимізації ґрунтових характеристик вирощують агроценози з фітомеліоративними якостями (багаторічні бобові трави, злаково-бобові травосумішки, сидерати), застосовують підвищені на 25-30 % норми органічних і мінеральних добрив. Для активізації біологічного режиму доцільне також використання мікробіологічних препаратів.

З метою запобігання утворення локальних просідань рекультивованої поверхні необхідно здійснювати щорічне планування агротехнологічними прийомами (боронуванням, культивацією, планувальниками) впродовж 3-4 років, доки не відбудеться самоущільнення насипів до показників рівноважної щільності ґрунту.

2.5 Технологія рекультивації земельних ділянок сільськогосподарського призначення, на яких були збудовані окопи, бліндажі, земляні склади для зберігання зброї і снарядів, капоніри

Рекультивацію земельних ділянок сільськогосподарського призначення, пошкоджених і зіпсованих у результаті воєнних дій із-за будівництва окопів, траншей, бліндажів, земляних складів, у яких зберігалась зброя і снаряди, здійснюють згідно робочих проектів. Роботи виконуються у безпечний період після завершення бойових дій, проведення розмінування земельної ділянки і надання компетентним органом дозволу на виконання робіт.

Комплекс робіт з рекультивації лінійних споруд мілітарного походження включає такі заходи:

- Очищення земельної ділянки від будівельного і побутового сміття, дерев'яних і інших інженерних конструкцій, інших включень, у т.ч. мілітарного характеру;
- Визначення основних параметрів об'єкту, який підлягає рекультивації (глибина, ширина, довжина, загальний об'єм, необхідна кількість субстратів відповідної якості для засипання траншейних виїмок);
- Визначення джерел видобутку субстратів, необхідних для засипання траншеї (гумусована ґрунтова маса, потенційно родючі гірські породи, інші субстрати природного і/або штучного походження, які можуть бути придатними для формування техноземної конструкції ґрунту і виконувати відповідно до робочого проекту господарські і екологічні функції);

- Визначення якісних характеристик різноякісних субстратів з метою їх гармонізації при формуванні дво- або тришарового ґрунтового профілю технозему.

- Варіанти (сценарії) формування конструкції ґрунтового профілю технозему залежать від його цільового призначення. Якщо об'єкт рекультивації (окоп) знаходиться поза межами сільськогосподарського поля (у лісових насадженнях, на пасовищах, для інших категорій земель несільськогосподарського призначення), достатньо заповнити його нефітотоксичним, бажано полідисперсним субстратом, перекривши зверху гумусованою ґрунтовою масою або потенційно родючою гірською породою. Глибина цього шару залежить від природно-кліматичної зони і якісних характеристик поширених зональних ґрунтів. Для зони Полісся достатньо сформувати 20-25 см такий шар, для Лісостепу і Степу – не менше 30 см.

- У разі, якщо об'єкт рекультивації (траншеї, окопи, бліндажі, інші виїмки ґрунту) знаходяться в межах сільськогосподарського поля, необхідно виконати комплекс робіт з відновлення ґрунтового покриву з максимально можливим усуненням факторів неоднорідності, які впливають на якість цільового використання земельної ділянки. Насамперед це гумусованість, гранулометричний склад, структурно-агрегатний стан, реакція ґрунтового середовища, ємність вбирання, засоленість, осолонцювання, забруднення важкими металами і іншими токсикантами хімічної і біологічної природи. За формування багат шарової конструкції технозему відхилення цих характеристик субстратів повинно бути в межах $\pm 10\%$.

- У пострекультиваційний період необхідно здійснювати моніторинг рекультивованого об'єкту. Залежно від природно-кліматичної зони і характеристики субстратів, які використовували в процесі створення ґрунтового профілю технозему, впродовж перших років необхідно здійснювати ремонт шляхом планування рекультивованої поверхні (за необхідності, при значних показниках просідання – підсипання гумусованою ґрунтовою масою).

- Тривалість періоду стабілізації поверхні рекультивованої ділянки залежить від: глибини порушеної товщі і характеристики субстратів, які використовували для засипання об'єму виїмок (окопів, бліндажів, земляних складів і ін.). Насамперед це усадочність (просадочність), гранулометричний склад, здатність до ущільнення і розущільнення).

Особливості біологічної рекультивації мілітарно зруйнованих земельних ділянок залежно від природно-кліматичних зон України.

Процес біологічної рекультивації земельних ділянок, порушених і ушкоджених від будівництва воєнних фортифікаційних споруд полягає у здійсненні комплексу агротехнологічних заходів, спрямованих на прискорення оптимізації ґрунтових режимів (насамперед водного, повітряного, поживного), фізичних, фізико-хімічних і агрохімічних властивостей, а також біологічного різноманіття. Реалізація цієї мети відбувається шляхом запровадження фітомеліоративних сівозмін з максимально можливим насиченням бобовими рослинами, вирощуванням сидеральних культур, внесення підвищених норм мінеральних і органічних добрив, застосування біопрепаратів, використання

нетоварної частки фітомаси культурних рослин у якості органічних добрив. Виконання такого комплексу заходів створить умови для вирощування рекомендованого для конкретної природно-кліматичної зони асортименту сільськогосподарських культур. Перевагу слід надавати агроценозам з вираженими ґрунтополіпшуючими фітомеліоративними можливостями.

Для зони Полісся у якості рослин-фітомеліорантів доцільно використовувати бобові: люпин, конюшину, галегу, лядвенець та інші. Для Лісостепової зони – люцерну, конюшину, козлятник східний, буркун білий, лядвенець і ін. Для Степу рекомендовані такі фітомеліоранти: люцерна, еспарцет, буркун білий, буркун лікарський, козлятник. Ефективним є вирощування багаторічних полікомпонентних бобово-злакових травосумішок.

Асортимент сидеральних культур для біологічної рекультивації мілітарно порушених земель сільськогосподарського використання не відрізняється від зональних рекомендацій для непорушених земель усіх природно-кліматичних зон України.

Особливості рекультивації земельних ділянок, на яких були споруджені капоніри.

Рекультивація земельної ділянки, на якій були споруджені **капоніри** (фортифікаційні земляні обвалування) для захисту воєнної техніки має свою специфіку, адже об'єктом рекультивації є не лише виїмки ґрунтової маси для будівництва земляних валів, а й земляні насипи різних параметрів за висотою і площею. Для будівництва капонірів, як правило, використовують земляний субстрат, який складається з технічної гетерогенної суміші ґрунтової маси (у т.ч. гумусованої) й підстилаючої ґрунт гірської материнської породи. Ці субстрати видобували із земельної ділянки, яка, як правило, знаходиться поряд з будівництвом капонірів. Тобто, земельна ділянка, яка підлягає рекультивації має як від'ємні форми рельєфу (виїмки ґрунту і підстилаючої материнської породи), так і насипи.

Суть рекультивації капонірів полягає у переміщенні механічними засобами субстрату земляних валів на територію, з якої вони знімалися при будівництві. Звичайно, новосформований рельєф і ґрунтовий профіль буде суттєво відрізнятися від непорушеного ґрунту, що потребує спеціальних меліоративних прийомів. Якість (родючість) таких ґрунтів буде суттєво гірша, ніж на непорушених землях і навіть на землях, рекультивованих від бомботурбацій. Адже для формування верхнього шару техноземного ґрунту при рекультивації вирв використовують верхній родючий шар непорушеного ґрунту, а для рекультивації земельної ділянки, на якій були збудовані капоніри – суміш субстратів з переважанням материнської гірської породи.

Територія капонірів, де знаходилась військова техніка, з великою ймовірністю забруднена паливо-мастильними матеріалами, залишками вибухових речовин, іншими небезпечними речовинами. За наявності ознак забруднення необхідно здійснити спеціальні заходи із знезараження земельної маси ділянки відомими фізичними, хімічними і біологічними методами.

2.6 Технологія рекультивації земельних ділянок сільськогосподарського призначення за значного, високого і дуже високого рівня забруднення території

Рекультивацію земельних ділянок земель сільськогосподарського призначення, які в результаті воєнних дій набули значного, високого і дуже високого рівня забруднення території за розрахованим комплексним показником Кс.

Якщо забруднена ділянка знаходиться в зоні Полісся і Лісостепу, то після очищення земельної ділянки від будівельного і побутового сміття, дерев'яних і інших інженерних конструкцій, інших включень, у т.ч. мілітарного характеру бажано зняти забруднений шар ґрунту (20-25 см) і територію вирви наповнити 15-20 см шаром глини для запобігання потрапляння забруднюючих речовин в ґрунтові води;

- Визначення основних параметрів об'єкту, який підлягає рекультивації (глибина, ширина, довжина, загальний об'єм, необхідна кількість субстратів відповідної якості для засипання траншейних виїмок);

- Визначення джерел видобутку субстратів, необхідних для засипання траншеї (гумусована ґрунтова маса, потенційно родючі гірські породи, інші субстрати природного і/або штучного походження, які можуть бути придатними для формування техноземної конструкції ґрунту і виконувати відповідно до робочого проекту господарські і екологічні функції);

- Визначення якісних характеристик різноякісних субстратів з метою їх гармонізації при формуванні дво- або тришарового ґрунтового профілю технозему.

- Варіанти (сценарії) формування конструкції ґрунтового профілю технозему залежать від його цільового призначення. Якщо об'єкт рекультивації (окоп) знаходиться поза межами сільськогосподарського поля (у лісових насадженнях, на пасовищах, для інших категорій земель несільськогосподарського призначення), достатньо заповнити його нефітотоксичним, бажано полідисперсним субстратом, перекривши зверху гумусованою ґрунтовою масою або потенційно родючою гірською породою. Глибина цього шару залежить від природно-кліматичної зони і якісних характеристик поширених зональних ґрунтів. Для зони Полісся достатньо сформувати 20-25 см такий шар, для Лісостепу і Степу – не менше 30 см.

- У разі, якщо об'єкт рекультивації (траншеї, окопи, бліндажі, інші виїмки ґрунту) знаходяться в межах сільськогосподарського поля, необхідно виконати комплекс робіт з відновлення ґрунтового покриву з максимально можливим усуненням факторів неоднорідності, які впливають на якість цільового використання земельної ділянки. Насамперед це гумусованість, гранулометричний склад, структурно-агрегатний стан, реакція ґрунтового середовища, ємність вбирання, засоленість, осолонцювання, забруднення важкими металами і іншими токсикантами хімічної і біологічної природи. За формування багат шарової конструкції технозему відхилення цих характеристик субстратів повинно бути в межах $\pm 10\%$.

3. Технологічні підходи до використання ІІ та робототехніки для рекультивації земель порушених внаслідок військових дій

3.1 Принципи побудови інтелектуально-роботизованих систем для відновлення пошкоджених земель

Беручи до уваги потенційно великі масштаби системи, складність вирішуваних задач та велику кількість даних, що потребують обробки, базовими принципами, на яких має будуватися система, виділено модульність, масштабованість, інтероперабельність та безпеку даних.

Принцип модульності полягає у створенні системи з взаємопов'язаних, але відносно незалежних функціональних блоків, кожен з яких відповідає за конкретний аспект процесу рекультивації. Сутність даного принципу базується на декомпозиції складної системи на менші підсистеми, що мають чітко визначені інтерфейси взаємодії.

Реалізація модульності досягається через застосування сучасних архітектурних патернів, зокрема мікросервісної архітектури, де кожен модуль функціонує як окремий сервіс з власною базою даних та API. Технічно це забезпечується використанням контейнерних технологій Docker та оркестраторів типу Kubernetes, що дозволяє незалежно розробляти, тестувати та розгортати окремі компоненти системи.

При практичному використанні принцип модульності надає можливість поетапного впровадження функціональності відповідно до наявних ресурсів та пріоритетів, що значно знижує фінансові ризики та дозволяє швидше отримати перші практичні результати. Крім того, модульна архітектура полегшує подальше масштабування системи та інтеграцію нових технологій без необхідності кардинальної перебудови вже існуючих компонентів.

Принцип масштабованості передбачає здатність системи ефективно функціонувати при збільшенні обсягів оброблюваних даних, кількості користувачів або розширенні географічного покриття без деградації продуктивності. Основою цього принципу є архітектурні рішення, що дозволяють як вертикальне масштабування через збільшення потужності серверного обладнання, так і горизонтальне масштабування через додавання нових вузлів до кластера.

Реалізація масштабованості забезпечується використанням хмарних технологій, зокрема платформи Microsoft Azure, що надає можливості автоматичного масштабування ресурсів залежно від поточного навантаження. Технічно це досягається через застосування еластичних сервісів типу Azure Container Instances, Azure Functions та Azure Kubernetes Service, які автоматично адаптують кількість обчислювальних ресурсів до поточних потреб системи. Це в свою чергу дозволяє починати роботу з обмеженими ресурсами на невеликих територіях та поступово розширювати систему для покриття регіональних або національних масштабів без необхідності кардинальної зміни архітектури.

Принцип сумісності визначає здатність системи до взаємодії з існуючими інформаційними системами, базами даних та програмними продуктами, що вже

використовуються або розроблені. Сутність цього принципу полягає у забезпеченні семантичної, синтаксичної та технічної сумісності через використання відкритих стандартів та протоколів обміну даними. Реалізація цього принципу досягається через імплементацію стандартизованих API, зокрема RESTful веб-сервісів, підтримку міжнародних стандартів геопросторових даних OGC (Open Geospatial Consortium) та використання загальноприйнятих форматів даних типу GeoJSON. Технічно це забезпечується створенням адаптерів та трансляторів даних, що дозволяють системі взаємодіяти з різноманітними джерелами інформації, включаючи кадастрові системи, метеорологічні бази даних, системи управління сільськогосподарським виробництвом, що дозволяє максимально використовувати вже наявну IT-інфраструктуру та уникнути дублювання функціональності.

Принцип безпеки даних охоплює комплекс заходів щодо захисту чутливої геопросторової інформації від несанкціонованого доступу, модифікації або знищення, враховуючи стратегічну важливість даних про стан земельних ресурсів та потенційні загрози національній безпеці. Основою цього принципу є багаторівнева система захисту, що включає криптографічне шифрування даних як у стані спокою, так і під час передачі, автентифікацію та авторизацію користувачів, аудит дій та моніторинг безпеки. Реалізація принципу безпеки забезпечується через використання сучасних протоколів шифрування AES-256, SSL/TLS для захищеної передачі даних, багатофакторної автентифікації через Azure Active Directory, системи управління доступом на основі ролей RBAC та технологій zero-trust архітектури. Додатково застосовуються методи диференційної приватності для захисту індивідуальної інформації в агрегованих звітах та технології blockchain для забезпечення цілісності критично важливих даних. У практичному використанні принцип безпеки даних гарантує відповідність вимогам законодавства щодо захисту персональних даних, мінімізує ризики кібератак та витоку інформації, що може бути використана ворожими силами, а також забезпечує довіру громадськості та міжнародних партнерів до результатів роботи системи рекультивації земель.

3.2 Застосування методів комп'ютерного зору для виявлення ушкоджень та планування рекультивації

Застосування технологій комп'ютерного зору у задачах рекультивації земель представляє складну багаторівневу систему, що поєднує класичні методи обробки зображень з сучасними підходами глибокого навчання для автоматизованого виявлення, класифікації та аналізу різнотипних ушкоджень земельного покриття.

Запропонований комплексний підхід дозволяє вирішувати низку завдань для інспекції аграрних угідь на основі супутникових даних, зокрема їх класифікацію, ідентифікацію та локалізацію окремих типів ушкоджень та оцінку рівня ушкоджень на сільськогосподарських землях.

Основною метою створення інтелектуальної системи є автоматизація процедур аналізу великих територій шляхом збору та обробки зображень чи

відеозаписів із дронів для оцінки рівня ушкодження сільськогосподарських земель внаслідок військових дій. Особливістю даної предметної області є необхідність роботи з надзвичайно різноманітними типами ушкоджень, що відрізняються за геометричними характеристиками, спектральними властивостями та просторовими патернами, що потребує гібридного підходу до вибору алгоритмів та методів обробки.

Класифікація типів ушкоджень може базуватися на комплексному аналізі геометричних, спектральних та текстурних характеристик об'єктів з використанням сучасних моделей глибокого навчання, втім в межах цих методичних рекомендації перевагу надано дослідженню методів виявлення та детекції кратерів від вибухів, ідентифікації їх розмірів та глибини, що впливає на складність відновлювальних заходів і потребує диференційованого підходу до їх автоматичного виявлення. Малі та “свіжі” кратери зазвичай характеризуються чіткими круглими контурами та високим контрастом з навколишньою територією, що робить їх придатними для виявлення класичними методами контурного аналізу та детекції кіл в OpenCV. Втім більш старі або великі кратери діаметром від 3 до 10 метрів часто мають більш складну внутрішню структуру з можливими вторинними ушкодженнями, що потребує застосування або технологій трансфертного навчання, або тренування власних моделей, наприклад YOLO для локалізації пов'язаних із ними ушкоджень.

Додатковою проблемою дослідження та оцінки рівня деградації сільськогосподарських земель є наявність забудов, доріг, лісів, водних ресурсів, які покривають значну частину аналізованих територій та ускладнюють роботу моделей комп'ютерного зору.

Для вирішення цього питання розроблена технологічна реалізація системи комп'ютерного зору додатково проводить класифікацію знімків, яка базується на потужних моделях microsoft/Florence-2-large або microsoft/Florence-2-base з автоматичним завантаженням AutoProcessor та AutoModelForCausalLM з Hugging Face Transformers для детального опису зображень та виявлення об'єктів.

Модель Florence-2 забезпечує контекстний аналіз сцени з генерацією текстових описів природною мовою, що дозволяє не тільки виявити факт ушкодження, але й проаналізувати його у контексті навколишнього середовища через prompt-и типу <MORE_DETAILED_CAPTION> та <OD> для object detection. У випадку невдачі завантаження Florence-2, передбачено фолбек на модель CLIP (openai/clip-vit-large-patch14) для базової класифікації, що забезпечує стійкість системи до технічних збоїв.

Система визначає землі сільськогосподарського призначення на зображеннях на основі ключових слів у згенерованому описі та виявлених об'єктів, використовуючи семантичний аналіз термінів типу "farm", "field", "crop", "agricultural land". Це дозволяє автоматично фільтрувати релевантні зображення та фокусувати подальший аналіз на дійсно сільськогосподарських територіях, підвищуючи точність та ефективність системи.

Інтеграція бібліотеки OpenCV для базової обробки зображень забезпечує фундаментальні операції фільтрації шумів, покращення контрасту через

адаптивну еквалізацію гістограми, сегментацію за кольором та текстурою через алгоритми кластеризації, а також використання аналізу та оцінки ушкоджень на основі методу детекції контурів та кіл. Ці методи особливо ефективні для попередньої обробки зображень та виявлення простих геометричних форм типу кратерів правильної форми, забезпечуючи швидку первинну оцінку ступеня ушкодження території.

Архітектура YOLO забезпечує швидке виявлення множинних об'єктів на зображеннях великого розміру, що критично важливо при обробці супутникових знімків, що можуть мати розміри в декілька гігапікселів. Передтренувана модель YOLO адаптується для локалізації специфічних типів ушкоджень сільськогосподарських земель через навчання на спеціалізованих датасетах з подальшою оптимізацією для роботи на мобільних пристроях та edge-computing пристроях.

Система оптимізації параметрів використовує бібліотеку Optuna для параметричної оптимізації процедур оцінки ушкоджень, що дозволяє автоматично налаштовувати гіперпараметри алгоритмів комп'ютерного зору для максимізації точності виявлення та мінімізації false positive результатів. Це особливо важливо для адаптації системи до різних географічних регіонів та типів місцевості, де характеристики ушкоджень можуть варіюватися.

3.3 Застосування технологій QGIS для геоінформаційного аналізу

Геоінформаційна система QGIS відіграє центральну роль у просторовому аналізі даних рекультивації, забезпечуючи інтеграцію результатів автоматизованого виявлення ушкоджень з контекстною геопросторовою інформацією та створення аналітичних продуктів для підтримки прийняття рішень. Особливістю використання QGIS у контексті післявоєнної рекультивації є необхідність роботи з надзвичайно різноманітними типами геоданих, що включають результати дистанційного зондування, дані польових вимірювань, адміністративно-територіальні межі, інформацію про інфраструктурні об'єкти та екологічні обмеження.

Система плагінів QGIS розширює базову функціональність для специфічних потреб аналізу ушкоджень земель. Semi-Automatic Classification Plugin надає можливості для автоматизованої класифікації мультиспектральних супутникових знімків з контрольованим навчанням, що дозволяє виділяти класи земного покриття та виявляти зміни між різними періодами спостережень.

Методики просторового аналізу ушкоджень базуються на комплексному підході, що поєднує геометричний аналіз з атрибутивними характеристиками об'єктів. Створення буферних зон навколо виявлених кратерів дозволяє оцінити вторинний вплив ушкоджень на навколишні території та визначити зони підвищеного ризику для сільськогосподарського використання.

Ключовим нововведенням у аналізі ушкоджень є застосування діаграм Вороного для класифікації ділянок за рівнем хімічного ушкодження та інтеграції цієї інформації з геометричними характеристиками фізичних ушкоджень. Основою цього підходу є визнання того факту, що прямі вимірювання хімічного

забруднення ґрунту є надзвичайно дорогими та часозатратними процедурами, особливо на великих територіях, тоді як відновлення кратерів та вирв суттєво залежить як від їх фізичних розмірів, так і від ступеня хімічного забруднення навколишнього середовища.

Методологія використання діаграм Вороного полягає у створенні полігонального розбиття досліджуваної території, де кожна комірка Вороного відповідає зоні впливу однієї точки вимірювання хімічного забруднення, при цьому кожна точка всередині комірки належить до найближчої точки вимірювання (рис. 3.23).

Це дозволяє ефективно інтерполювати рівні забруднення на всю територію на основі обмеженої кількості дорогих хімічних аналізів, проведених у стратегічно обраних локаціях. Кратери та вирви, виявлені методами комп'ютерного зору на супутникових зображеннях, накладаються на діаграму Вороного, що дозволяє кожному ушкодженню присвоїти відповідний рівень хімічного забруднення на основі його просторового розташування.

Інтеграція геометричних характеристик ушкоджень з рівнями хімічного забруднення створює багатовимірну класифікаційну систему складності відновлення. Невеликі кратери у зонах з низьким рівнем забруднення класифікуються як прості для відновлення та потребують стандартних процедур засипання та рекультивації. Великі кратери у зонах високого хімічного забруднення потребують комплексного підходу, що включає попередню детоксикацію ґрунту, спеціальні технології засипання та довгостроковий моніторинг екологічної безпеки. Проміжні категорії ушкоджень отримують відповідні рейтинги складності, що дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів та планувати послідовність відновлювальних заходів.

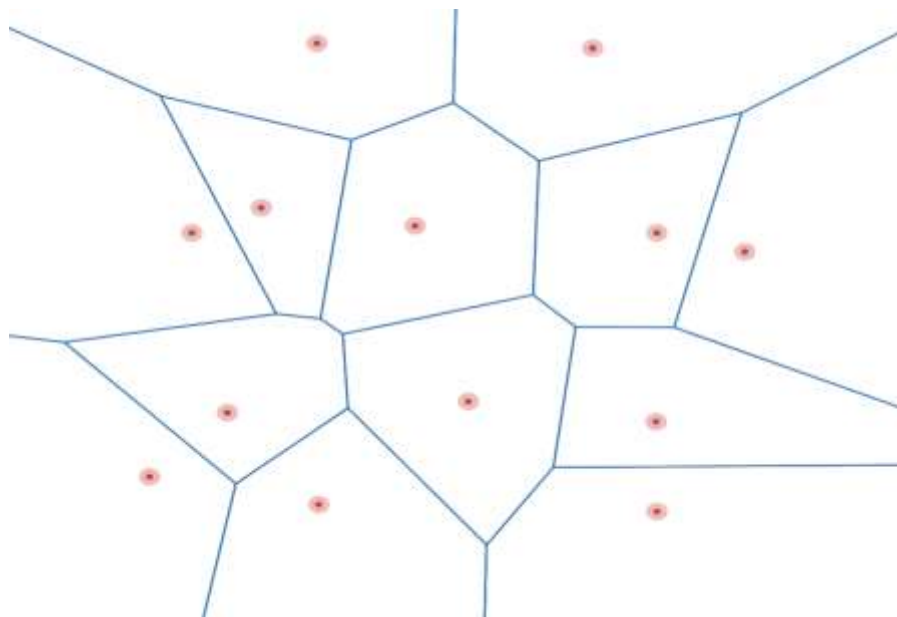


Рисунок 3.3 – Діаграма Вороного розбиття території за рівнем забруднення

Використання QGIS для планування відновлювальних заходів базується на Network Analyst функціональності для побудови оптимальних маршрутів

переміщення спеціалізованої техніки між ділянками з урахуванням стану доріг, топографічних умов та обмежень доступу через безпекові фактори.

Альтернативним підходом до планування рекультиваційних заходів та формування оптимальних маршрутів переміщення спеціалізованої техніки є адаптація задачі комівояжера (Traveling Salesperson Problem, TSP). В цьому випадку розпізнані вирви та їх характеристики визначають набір точок обходу, а час необхідний на рекультивацію пов'язаний із відстанями між вирвами. Таким чином "відстань" в термінах алгоритму представляє собою час, необхідний для виконання комплексу робіт та переміщення техніки і матеріалів до наступної вирви.

Першим кроком планування рекультивації є формування структури даних, що описує виявлені ушкодження та логістичні параметри відновлювальних робіт: відстані, складність, перелік технологічних процедур, матеріалів, техніки, тощо.

```
def create_reclamation_data_model():
    """Зберігає дані для задачі планування рекультивації."""
    data = {}
    # Матриця часових витрат між ушкодженими ділянками
    # Включає час переміщення техніки + час виконання робіт
    data["time_matrix"] = [
        [0, 180, 95, 120, 210, 165, 145, 80, 190, 110, 130, 175, 155],
        [180, 0, 140, 125, 85, 100, 75, 185, 60, 135, 115, 45, 70],
        [95, 140, 0, 40, 105, 90, 160, 100, 170, 35, 95, 130, 115],
        # ... продовження матриці для всіх виявлених ушкоджень
    ]
    data["num_teams"] = 1 # Кількість бригад рекультивації
    data["base_depot"] = 0 # Базова станція (склад матеріалів)
    return data
```

Матриця часових витрат є двовимірним масивом, де елемент $[i,j]$ представляє загальний час, необхідний для переміщення бригади рекультивації з ділянки i до ділянки j та виконання відновлювальних робіт. Для кожного типу ушкоджень чи сценарію відновлення малі кратери (швидке відновлення), середні кратери (стандартне відновлення), великі кратери (складне відновлення), зони хімічного забруднення тощо відповідатиме своя матриця відстаней та кількість бригад/техніки, які можуть виконувати відповідні роботи.

Створення моделі маршрутизації

Наступний крок - створення менеджера індексів та моделі маршрутизації, адаптовану для специфіки рекультивації земель:

```
data = create_reclamation_data_model()
manager = pywrapcp.RoutingIndexManager(
    len(data["time_matrix"]), data["num_teams"], data["base_depot"]
)
routing = pywrapcp.RoutingModel(manager)
```

Вхідними параметрами для RoutingIndexManager є кількість виявлених ушкоджених ділянок (включаючи базову станцію), кількість бригад рекультивації та номер базової станції, звідки починається та куди повертається маршрут.

Створення функції оцінки часових витрат

Для використання solver-а маршрутизації необхідно створити функцію callback, що приймає будь-яку пару локацій та повертає час, необхідний для переходу між ними з урахуванням специфіки рекультивациі:

```
def time_callback(from_index, to_index):
    """Повертає час між двома ділянками."""
    from_node = manager.IndexToNode(from_index)
    to_node = manager.IndexToNode(to_index)
    return data["time_matrix"][from_node][to_node]

transit_callback_index = routing.RegisterTransitCallback(time_callback)
```

Функція callback приймає два індекси та повертає відповідний елемент матриці часових витрат, що включає як час переміщення техніки, так і час виконання рекультивациі.

Налаштування параметрів оптимізації

На наступному кроці відбувається пошуку та евристичний метод для знаходження початкового рішення:

```
search_parameters = pywrapcp.DefaultRoutingSearchParameters()
search_parameters.first_solution_strategy = (
    routing_enums_pb2.FirstSolutionStrategy.PATH_CHEAPEST_ARC
)
```

Стратегія PATH_CHEAPEST_ARC створює початковий маршрут шляхом послідовного додавання ребер з найменшою вагою, що не ведуть до раніше відвіданих ділянок (окрім базової станції).

Функція виведення результатів

Функція для відображення оптимального плану рекультивациі:

```
def print_reclamation_plan(manager, routing, solution):
    """Виводить план рекультивациі на консоль."""
    print(f"Загальний час виконання: {solution.ObjectiveValue()} годин")
    index = routing.Start(0)
    plan_output = "Маршрут бригади рекультивациі:\n"
    total_time = 0
    while not routing.IsEnd(index):
        plan_output += f"Ділянка_{manager.IndexToNode(index)} ->"
        previous_index = index
        index = solution.Value(routing.NextVar(index))
        total_time += routing.GetArcCostForVehicle(previous_index, index, 0)
    plan_output += f"Базова станція_{manager.IndexToNode(index)}\n"
    plan_output += f"Загальний час маршруту: {total_time} годин\n"
    print(plan_output)
```

Наступний приклад демонструє застосування адаптованої задачі комівояжера для планування відновлення території площею 10 квадратних кілометрів, на якій методами комп'ютерного зору виявлено 25 кратерів малого розміру та 8 кратерів із зонами хімічного забруднення.

Таким чином дані для задачі складаються з 33 точок на території (25 малих кратерів + 8 кратерів із забрудненням). Програма створює дані у вигляді масиву координат, що відповідають точкам ушкоджень:

```
def create_field_damage_data():
    """Зберігає дані про ушкодження поля."""
    data = {}
    # Координати ушкоджень у блочних одиницях (100м x 100м)
    data["damage_locations"] = [
```

```

(288, 149), (288, 129), (270, 133), (256, 141), (256, 157),
(246, 157), (236, 169), (228, 169), (228, 161), (220, 169),
# ... координати всіх виявлених ушкоджень
]
data["num_teams"] = 1
data["depot"] = 0 # Базова станція
return data

```

Обчислення матриці часових витрат

Функція обчислює евклідову відстань між будь-якими двома точками та конвертує її у час, необхідний для рекультивації, з урахуванням швидкості переміщення техніки та складності робіт (всі часові витрати умовні і мають визначатися за результатами технічної оцінки):

```

def compute_reclamation_time_matrix(locations, damage_types):
    """Створює матрицю часових витрат для рекультивації."""
    times = {}
    for from_counter, from_node in enumerate(locations):
        times[from_counter] = {}
        for to_counter, to_node in enumerate(locations):
            if from_counter == to_counter:
                times[from_counter][to_counter] = 0
            else:
                # Базовий час переміщення (швидкість 15 км/год)
                travel_time = int(
                    math.hypot((from_node[0] - to_node[0]),
                               (from_node[1] - to_node[1])) * 0.1 / 15 * 60
                )
                # Додавання часу рекультивації залежно від типу ушкодження
                work_time = get_work_time_by_damage_type(damage_types[to_counter])
                times[from_counter][to_counter] = travel_time + work_time
    return times

def get_work_time_by_damage_type(damage_type):
    """Повертає час рекультивації залежно від типу ушкодження."""
    work_times = {
        'small_crater': 30,      # 30 хвилин
        'medium_crater': 120,    # 2 години
        'large_crater': 480,     # 8 годин
        'chemical_contamination': 720, # 12 годин
        'mixed_damage': 600      # 10 годин
    }
    return work_times.get(damage_type, 60) # За замовчуванням 1 година

```

При запуску програми вона відображає оптимальний план рекультивації, включаючи послідовність відвідування ушкоджених ділянок та загальний час виконання робіт. OR-Tools знаходить ефективне рішення дуже швидко: менше ніж за секунду на типовому комп'ютері. Загальний час рекультивації території залежить від кількості та складності ушкоджень, наявності матеріалів, кількості бригад та точності часових оцінок. Але у будь-якому разі він дозволяє мінімізувати час використання спеціалізованої техніки та загальний час відновлення сільськогосподарських угідь після військових дій, забезпечуючи науково обґрунтоване планування рекультиваційних заходів.

Процес рекультивації включає очищення від уламків, заповнення вирв ґрунтом або матеріалами, демінування, відновлення родючості ґрунту тощо. *Логістика* в цьому процесі відіграє ключову роль, оскільки передбачає транспортування матеріалів (наприклад, ґрунту, обладнання) до численних пошкоджених ділянок за допомогою автопарку транспортних засобів.

Маршрутизація транспортних засобів (Vehicle Routing Problem – VRP) є узагальненням задачі комівояжера (Traveling Salesman Problem), де кілька

транспортних засобів стартують з депо, відвідують локації та повертаються, мінімізуючи критерій, такий як загальна відстань або максимальний час маршруту (Toth, & Vigo, 2014; Laporte, 2009).

Основні варіанти VRP включають:

CVRP (Capacitated VRP) – з обмеженнями на вантажопідйомність транспортних засобів.

VRPTW (VRP with Time Windows) – з часовими вікнами для доставки, що враховує робочі зміни і вікна доступності. Необхідно побудувати маршрут так, щоб прибуття у точку відбувалося у заданий часовий інтервал.

MDVRP (Multi-Depot VRP) – з кількома логістичними центрами (депо) для транспортних засобів і матеріалів. Модель має визначити, з якого депо який транспорт має їхати.

Mixed Fleet VRP – у процесі задіяні різні типи транспортних засобів: вантажівки для матеріалів, спеціалізовані автомобілі для бригад, важка інженерна техніка.

Pickup-and-Delivery – вивіз забрудненого ґрунту на полігон і підвіз чистого ґрунту з кар'єру.

Застосування алгоритмів VRP з використанням відкритого програмного пакета для розв'язання задач оптимізації OR-Tools від Google може суттєво підвищити ефективність координації робіт з відновлення пошкоджених територій:

- скоротити загальний пробіг техніки;
- зменшити час простою обладнання;
- підвищити продуктивність бригад;
- прискорити темпи рекультивації.

Задача маршрутизації транспортних засобів (VRP) є комбінаторною оптимізаційною задачею та задачею цілочисельного програмування, мета якої полягає в знаходженні оптимальних маршрутів для кількох транспортних засобів, що відвідують набір локацій (Official OR Tools).

Процес рекультивації земель після військових дій можна представити як модифіковану VRP, де:

- Локації (вузли):
 - Ділянки з вибуховими вирвами різного розміру
 - Заміновані території різного ступеня забруднення
 - Базис технічних засобів розмінування
 - Пункти утилізації вибухонебезпечних предметів
- Депо: база, де завантажуються земля та матеріали
- Транспортні засоби:
 - Вантажівки або спеціальна техніка з обмеженою місткістю для швидкого та безпечного очищення забрудненої землі
 - Команди саперів з різною спеціалізацією
 - Дрони для попереднього обстеження територій
- Обмеження:
 - Часові вікна для проведення робіт (уникнення темряви або погодніх умов)

- Пріоритетність ділянок (сільськогосподарські землі, критична інфраструктура)
- Технічні можливості транспортних засобів (наприклад, місткість у розмірі 15 м³ ґрунту)
- Безпекові вимоги

При цьому для прийняття рішень щодо рекультивації пошкоджених земельних ділянок треба враховувати, те що кожна вирва має "попит" – об'єм ґрунту, необхідний для заповнення.

Етапи реалізації задачі VRP для рекультивації земельних ділянок:

1. Збір даних:

- Визначення координат пошкоджених ділянок (вирв) за допомогою GIS-систем або супутникових даних.
- Обчислення матриці відстаней (використовуючи Google Distance Matrix API, гіс-системи або Euclidean відстані).
- Визначення попиту (об'єму матеріалів) і місткості транспортних засобів.

2. Моделювання в OR-Tools:

- Застосування Python API OR-Tools.
- Розробка моделі заповнення вирв на підставі вибору одного або декількох варіантів VRP для заповнення вирв.
- Модифікація моделі за рахунок:
 - пріоритезації ділянок і додавання відповідних часових вікон;
 - додавання невизначеності (наприклад, через ризик мін).

3. Розв'язання задачі та аналіз результатів:

- OR Tools генерує набір маршрутів.
- Користувач аналізує отримані маршрути, перевіряє їх на відповідність усім обмеженням і здоровий глузд.
- Результати візуалізуються на мапі (наприклад, за допомогою бібліотек folium чи matplotlib у Python).

4. Інтеграція з іншими інструментами, зокрема: GIS для візуалізації маршрутів.

5. Оцінка ефективності – порівняння з неоптимізованими маршрутами.

Блок створення даних на мові програмування Python має наступний вигляд:

```
def create_data_model():
    data = {}
    data['distance_matrix'] = [...] # Матриця відстаней між вирвами
    data['demands'] = [0, 10, 15, 20, ...] # Попит (об'єм ґрунту для кожної вирви)
    data['vehicle_capacities'] = [15, 15, ...] # Місткість транспортних засобів
    data['num_vehicles'] = 3 # Кількість транспортних засобів
    data['depot'] = 0 # Депо
    return data
```

Наступна функція створює зворотний виклик distance, який повертає вартість (відстань, час) переміщення між двома будь-якими локаціями та передає його до розв'язувача. Вона також встановлює вартість дуги, яка визначає вартість переміщення, як відстані дуг:

```
def distance_callback(from_index, to_index):
    """Returns the distance between the two nodes."""
    # Convert from routing variable Index to distance matrix NodeIndex.
    from_node = manager.IndexToNode(from_index)
    to_node = manager.IndexToNode(to_index)
    return data["distance_matrix"][from_node][to_node]
transit_callback_index = routing.RegisterTransitCallback(distance_callback)
routing.SetArcCostEvaluatorOfAllVehicles(transit_callback_index)
```

Щоб розв'язати VRP, потрібно створити вимір відстані, який обчислює сукупну відстань, пройдену кожним транспортним засобом по його маршруту. Потім можна встановити вартість, пропорційну максимальній загальній відстані по кожному маршруту. Програми маршрутизації використовують виміри для відстеження кількостей, що накопичуються протягом маршруту транспортного засобу. Наведений нижче код створює вимір відстані, використовуючи метод розв'язувача AddDimension. Аргументом transit_callback_index є індекс для distance_callback:

```
dimension_name = "Distance"
routing.AddDimension(
    transit_callback_index,
    0, # no slack
    3000, # vehicle maximum travel distance
    True, # start cumul to zero
    dimension_name,
)
distance_dimension = routing.GetDimensionOrDie(dimension_name)
distance_dimension.SetGlobalSpanCostCoefficient(100)
```

Функція, яка виводить розв'язок:

```
def print_solution(data, manager, routing, solution):
    """Prints solution on console."""
    print(f"Objective: {solution.ObjectiveValue()}")
    max_route_distance = 0
    for vehicle_id in range(data["num_vehicles"]):
        if not routing.IsVehicleUsed(solution, vehicle_id):
            continue
        index = routing.Start(vehicle_id)
        plan_output = f"Route for vehicle {vehicle_id}:\n"
        route_distance = 0
        while not routing.IsEnd(index):
            plan_output += f" {manager.IndexToNode(index)} -> "
            previous_index = index
            index = solution.Value(routing.NextVar(index))
            route_distance += routing.GetArcCostForVehicle(
                previous_index, index, vehicle_id
            )
        plan_output += f" {manager.IndexToNode(index)}\n"
        plan_output += f"Distance of the route: {route_distance}m\n"
        print(plan_output)
        max_route_distance = max(route_distance, max_route_distance)
    print(f"Maximum of the route distances: {max_route_distance}m")
```

Ця функція відображає маршрути для транспортних засобів та загальну протяжність маршрутів. Фрагмент оптимальної маршрутизації транспортного засобу для заповнення вирв наведено на рис. 3.4.

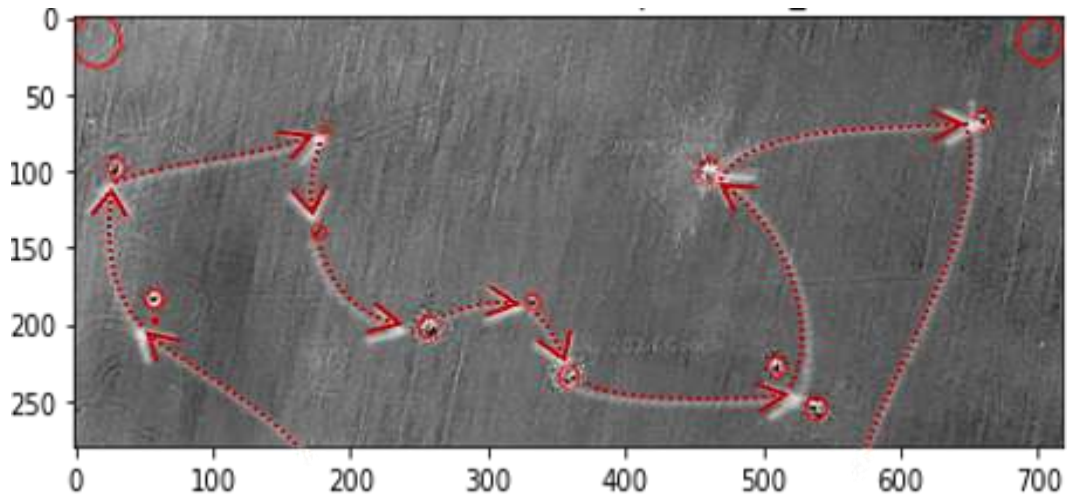


Рисунок 3.4 – Фрагмент маршруту транспортного засобу
задля заповнення вирв

Нижче код основної функції класичного варіанту VRP:

```
def main():
    """Entry point of the program."""
    # Створити екземпляр задачі з даними.
    data = create_data_model()
    # Створити менеджер індексу маршрутизації.
    manager = pywrapcp.RoutingIndexManager(
        len(data["distance_matrix"]), data["num_vehicles"], data["depot"]
    )
    # Створити модель маршрутизації.
    routing = pywrapcp.RoutingModel(manager)
    # Створіть та зареєструйте зворотний виклик для транзиту.
    transit_callback_index = routing.RegisterTransitCallback(distance_callback)
    # Визначте вартість кожної дуги.
    routing.SetArcCostEvaluatorOfAllVehicles(transit_callback_index)
    # Додати обмеження відстані.
    dimension_name = "Distance"
    routing.AddDimension(
        transit_callback_index,
        0, # no slack
        3000, # максимальна дальність проїзду транспортного засобу
        True, # почати накопичення до нуля
        dimension_name,
    )
    distance_dimension = routing.GetDimensionOrDie(dimension_name)
    distance_dimension.SetGlobalSpanCostCoefficient(100)
    # Встановлення евристики першого рішення.
    search_parameters = pywrapcp.DefaultRoutingSearchParameters()
    search_parameters.first_solution_strategy = (
        routing_enums_pb2.FirstSolutionStrategy.PATH_CHEAPEST_ARC
    )
    # Розв'язати задачу
    solution = routing.SolveWithParameters(search_parameters)
    # Вивести рішення задачі на екран.
    if solution:
        print_solution(data, manager, routing, solution)
    else:
        print("No solution found !")

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Зонування території за пріоритетністю відновлення використовує багатокритеріальний аналіз, що враховує екологічну критичність ділянки, її

сільськогосподарський потенціал, близькість до населених пунктів та інфраструктурних об'єктів, а також технічну складність відновлювальних заходів.

Аналіз доступності інфраструктури включає розрахунок відстаней до джерел водопостачання, електроенергії, складів будівельних матеріалів та баз технічного обслуговування спеціалізованої техніки. Це дозволяє оцінити логістичні витрати для кожної ділянки відновлення та оптимізувати послідовність робіт для мінімізації транспортних витрат та часу простою обладнання.

3.4 Методологія планування відновлення земель на основі цифрових та робототехнічних технологій

Застосування теорії розкладів і, зокрема, адаптація класичної задачі Job Shop Scheduling Problem для планування заходів рекультивації земель представляє інноваційний підхід до оптимізації використання обмежених ресурсів у просторово-розподілених завданнях відновлення. Традиційна постановка Job Shop Problem розглядає планування виконання множини робіт на множині машин з урахуванням технологічних обмежень та послідовності операцій, однак специфіка рекультивації земель потребує суттєвих модифікацій базової моделі для врахування геопросторових факторів, варіативності складності ушкоджень та обмежень реального світу.

Фундаментальною особливістю адаптованої задачі є введення просторової компоненти, де кожна "робота" представляє конкретну ушкоджену ділянку з фіксованими географічними координатами, а "машини" відповідають спеціалізованим бригадам або одиницям техніки з різними можливостями та обмеженнями мобільності. Ця просторова прив'язка створює додаткові обмеження у вигляді часу переміщення між локаціями, що не існує у класичній постановці задачі та потребує розробки спеціалізованих алгоритмів оптимізації, що враховують географічні відстані та стан транспортної інфраструктури.

Класифікація ушкоджених ділянок за складністю відновлення базується на багатофакторній системі оцінювання, що інтегрує результати автоматизованого виявлення ушкоджень методами комп'ютерного зору з даними про хімічне забруднення, отриманими через аналіз діаграм Вороного. Створено чотири основні сценарії складності відновлення. Перший сценарій включає малі кратери до 3 метрів діаметром у зонах з низьким рівнем хімічного забруднення, що потребують стандартних процедур засипання та поверхневої рекультивації з використанням базової техніки типу бульдозерів та культиваторів. Другий сценарій охоплює середні ушкодження або малі кратери у зонах помірного забруднення, що вимагають додаткових заходів детоксикації та використання спеціалізованого обладнання для роботи з забрудненими ґрунтами.

Третій сценарій складності включає великі кратери або ушкодження середнього розміру у зонах високого хімічного забруднення, що потребують

комплексного підходу з попередньою детоксикацією, складними земляними роботами та довгостроковим моніторингом.

Четвертий, найскладніший сценарій, охоплює великі кратери у зонах критичного хімічного забруднення, що потребують залучення високоспеціалізованої техніки, експертних бригад та можливого тимчасового вилучення території з сільськогосподарського обігу на період детоксикації.

Оптимізація використання техніки та людських ресурсів здійснюється через розв'язання модифікованої задачі Job Shop Problem з додатковими обмеженнями та цільовими функціями. Основними типами ресурсів є землерийна техніка різної потужності, транспортні засоби для перевезення ґрунту та будівельних матеріалів, спеціалізоване обладнання для роботи з забрудненими ґрунтами, бригади кваліфікованих робітників різної спеціалізації, а також обмежені запаси матеріалів типу чистого ґрунту, насіння, добрив та детоксикуючих речовин.

Часові обмеження включають сезонні вікна для проведення різних типів робіт, де основні земляні роботи оптимально проводити у сухий період року, сівбу та висадку рослинності у весняно-осінні періоди, а деякі види хімічної обробки ґрунту можуть мати обмеження за температурними умовами. Додатково враховуються погодні умови, що можуть призупинити роботи, та безпекові обмеження, що можуть тимчасово закривати доступ до певних територій.

Цільова функція оптимізації є багатокритеріальною та включає мінімізацію загального часу виконання всіх робіт, мінімізацію логістичних витрат на переміщення техніки та транспортування матеріалів, максимізацію використання наявних ресурсів для уникнення простоїв дорогого обладнання, та максимізацію екологічної ефективності через пріоритизацію відновлення найбільш критичних з екологічної точки зору ділянок. Розв'язання такої складної оптимізаційної задачі потребує застосування метаевристичних алгоритмів, зокрема генетичних алгоритмів для глобального пошуку оптимуму та алгоритмів симульованого відпалення для локальної оптимізації знайдених рішень.ок з координатами та характеристиками

- Множина бригад з різною спеціалізацією та обладнанням
- Часові вікна для виконання робіт (сезонні обмеження)
- Пріоритетність відновлення (критичність ділянки)
- Логістичні обмеження (транспорт, склади матеріалів)

3.5 Інтеграція програмних і робототехнічних компонентів у єдиній системі рекультивації

Створення ефективної системи інтеграції різнорідних компонентів рекультивації земель базується на сучасній мікросервісній архітектурі, що забезпечує безшовну взаємодію між модулями обробки геопросторових даних, алгоритмами машинного навчання, системами планування та користувацькими інтерфейсами. Комп'ютерна програма розроблена на принципах модульності та підготовлена для переходу на мікросервісну архітектуру, включаючи основний

логічний функціонал, що відповідає за різні етапи обробки зображень, бекенд на FastAPI, що забезпечує інтеграцію із окремим React-фронтом, контейнеризованим за допомогою Docker та Nginx.

Центральним елементом такої архітектури є RESTful API, що функціонує як універсальний шлюз для обміну даними та координації робочих процесів між автономними компонентами системи.

Використання принципів мікросервісної архітектури, де кожен функціональний домен представлений окремим сервісом з власною відповідальністю та автономними життєвими циклами розробки і розгортання забезпечує реалізацію наступної логіки:

Сервіс обробки супутникових даних відповідає за прийом, валідацію, попередню обробку та збереження дистанційних даних, надаючи стандартизовані endpoint-и для завантаження нових знімків, запиту метаданих та ініціації процедур атмосферної корекції.

Сервіс комп'ютерного зору інкапсулює алгоритми YOLO, OpenCV та Florence-2, надаючи асинхронні API для виявлення ушкоджень з можливістю відстеження статусу виконання довготривалих обчислювальних задач.

Сервісна архітектура організована навколо спеціалізованого AgriculturalImageAnalysisService, що інкапсулює всю логіку аналізу сільськогосподарських зображень та забезпечує уніфіковані API ендпоінти. Центральний ендпоінт POST /api/analyze-image/ приймає файли зображень, виконує їх класифікацію на предмет сільськогосподарського призначення, надає детальний опис через Florence-2 та виявляє відповідні об'єкти через YOLO, повертаючи структуровані результати у форматі JSON.

Система валідації та стандартизації відповідей реалізована через Pydantic моделі, що забезпечують строгу типізацію та валідацію даних. DetectionResponse модель структурує результати аналізу, включаючи булеві індикатори сільськогосподарського призначення, рівні впевненості, класифікацію, детальні описи, знайдені ключові слова та списки виявлених об'єктів. AnalyzeImageResponse забезпечує загальну обгортку для відповідей API з метаданими про використану модель та статус обробки.

Управління конфігурацією та безпекою здійснюється через централізований config_loader, що забезпечує безпечне завантаження API-токенів для Hugging Face та інших зовнішніх сервісів з змінних середовища. Система підтримує гнучке конфігурування через .env файли та .ini конфігураційні файли, що дозволяє легко адаптувати систему до різних середовищ розгортання.

Паттерн dependency injection реалізований через FastAPI dependencies модуль, що забезпечує елегантне управління життєвими циклами сервісів та автоматичну обробку ситуацій недоступності сервісів через повернення HTTP 503 статусу. Це дозволяє системі деградувати gracefully при проблемах з окремими компонентами.

Фронтенд інтеграція реалізована через повнофункціональний React застосунок з сучасним технологічним стеком, що включає Tailwind CSS для стилізації, Axios для HTTP комунікації та React Router для маршрутизації.

Ключовою особливістю є наявність механізму "Mock API" в `apiService.js`, що дозволяє фронтенд розробникам працювати незалежно від стану бекенду, використовуючи заздалегідь визначені мок-дані для всіх типів аналізу.

Асинхронна обробка та workflow управління забезпечуються через event-driven архітектуру з підтримкою довготривалих операцій машинного навчання. Система відстеження стану включає індикатори завантаження, обробку помилок та автоматичне перенаправлення користувачів на сторінки результатів після завершення аналізу. Компонент `LoadingSpinner` забезпечує візуальний фідбек під час обробки, підвищуючи користувацький досвід.

Контейнеризація та оркестрація системи реалізована через `Docker` з підтримкою `Docker Compose` для локального розгортання та готовністю до `Kubernetes` для продакшн середовищ. `Nginx` виступає як reverse проху та статичний файловий сервер для `React` застосунку, забезпечуючи оптимальну продуктивність та масштабованість системи. Архітектура підтримує горизонтальне масштабування через додавання додаткових інстансів сервісів та автоматичний load balancing.

Подальший розвиток системи полягає в інтеграції із допоміжними сервісами, які виходять за рамки цього дослідження, але тим не менш формують цілісний методологічний підхід. Геоаналітичний сервіс - підтримує функціональність `QGIS` через `PyQGIS API` та забезпечує просторовий аналіз, включаючи побудову діаграм Вороного, розрахунок буферних зон та багатокритеріальний аналіз пріоритетності відновлення.

Сервіс планування реалізує алгоритми розв'язання адаптованої `Job Shop Problem` і надає API для оптимізації розкладів робіт з урахуванням ресурсних та часових обмежень.

Кожен сервіс дотримується принципів REST архітектури, використовуючи стандартні HTTP методи `GET`, `POST`, `PUT`, `DELETE` для відповідних операцій читання, створення, оновлення та видалення ресурсів.

Стандартизація форматів обміну даними здійснюється через використання `JSON` для структурованих даних та `GeoJSON` для геопросторових об'єктів, що забезпечує сумісність з широким спектром геоінформаційних систем та веб-клієнтів. Метадані супутникових знімків структуруються, що полегшує інтеграцію з існуючими каталогами геоданих та забезпечує довгострокову збереженість інформації. Результати автоматизованого виявлення ушкоджень кодуються у форматі, сумісному з `Open Geospatial Consortium` стандартами, що дозволяє імпорт в різноманітні ГІС платформи без додаткових перетворень.

Система обробки подій та workflow базується на асинхронній архітектурі з використанням черг повідомлень для забезпечення надійності та масштабованості обробки великих обсягів геоданих. Надходження нового супутникового знімка автоматично ініціює каскад обробних процедур, включаючи валідацію якості даних, геометричну корекцію, виявлення змін порівняно з попередніми знімками, автоматизоване виявлення ушкоджень та оновлення просторової бази даних. Кожен етап workflow генерує події, що логуються для аудиту та можуть використовуватися для налаштування оповіщень та тригерів подальших процесів.

Система моніторингу та відстеження стану інтегрує метрики продуктивності окремих сервісів з бізнес-метриками процесу рекультивації, забезпечуючи комплексне розуміння ефективності системи як з технічної, так і з предметної точки зору. Автоматизовані алерти налаштовуються для критичних сценаріїв, включаючи виявлення нових масштабних ушкоджень, аномальні затримки в обробці даних, та досягнення порогових значень завантаженості обчислювальних ресурсів.

ВИСНОВКИ

У ході проведеної роботи з'ясовано, що використання інтелектуальних і робототехнічних технологій у рекультивації пошкоджених земель має як фундаментальне, так і прикладне значення для відновлення сільськогосподарських угідь після військових дій.

Результати дослідження підтвердили, що відновлення деградованих територій є ефективним лише за умови поєднання безпілотних літальних апаратів, наземних роботизованих платформ та мультисенсорних комплексів із методами штучного інтелекту й сучасної цифрової аналітики. Застосування дронів з мультиспектральними й термальними камерами забезпечує оперативний і точний моніторинг навіть у зонах із підвищеною небезпекою. Наземні платформи дають можливість виконувати поглиблені вимірювання параметрів ґрунтів, що суттєво підвищує надійність отриманих результатів. Зібрані дані інтегруються за допомогою програмних засобів на основі комп'ютерного зору, геоінформаційних систем і хмарних інфраструктур, що дозволяє створювати цифрові карти пошкоджень та будувати прогностичні моделі.

У результаті аналізу показано, що класифікація вирв, оцінка їхніх параметрів і визначення потреб у рекультиваційних субстратах доцільно здійснювати з використанням алгоритмів машинного навчання та евристичних підходів. Це відкриває можливість замінити трудомісткі польові обміри автоматизованою обробкою супутникових та аерофотознімків, забезпечуючи швидкість і масштабованість оцінки великих територій.

Проведене узагальнення підтвердило, що застосування геоінформаційних систем, зокрема QGIS, у поєднанні з аеро- та супутниковими даними дає змогу виконувати просторово-часовий аналіз ушкоджень і формувати прогнози ефективності відновлювальних заходів. Інтегровані карти деградації земель, що враховують класифікацію вирв, рівень забруднення важкими металами та наслідки вибухів, є надійним інструментом для визначення пріоритетних ділянок і планування робіт.

Дослідження також показало, що ефективність рекультиваційних заходів значною мірою визначається рівнем розвитку хмарних платформ. Вони забезпечують централізоване зберігання, обробку й поширення великих обсягів даних, інтегруючи результати дистанційного зондування, польових експериментів та економічного моделювання. У результаті формується єдине інформаційне середовище для науковців, практиків і державних структур.

У ході роботи з'ясовано, що організація та планування процесів рекультивації вимагають використання адаптивних методів оптимізації. Застосування модифікацій задачі Job Shop Scheduling дає змогу ефективно розподіляти ресурси та формувати графіки робіт з урахуванням просторових характеристик. Такий підхід знижує часові й фінансові витрати, а також підвищує узгодженість між різними виконавцями.

Результати дослідження підтвердили, що методичні рекомендації мають практичне значення для різних груп користувачів. Для агровиробників вони слугують засобом оптимізації виробничих процесів і зменшення ризиків при роботі на пошкоджених територіях. Для наукової спільноти вони становлять основу подальших досліджень у сферах точного землеробства, цифрової агрономії та екологічної безпеки. Для органів державного управління ці рекомендації створюють інструментарій для розробки обґрунтованих рішень у сфері відновлення земельних ресурсів та аграрного потенціалу країни.

У підсумку доведено, що технології штучного інтелекту та робототехніки формують нову концепцію рекультивації земель, зруйнованих унаслідок воєнних дій. Вони дають змогу замінити традиційні методи, що відзначаються високою трудомісткістю й небезпекою, на інтегровані, автоматизовані та безпечні системи. Поєднання дистанційного зондування, мультисенсорних технологій, інтелектуальної аналітики та оптимізаційних моделей створює підґрунтя для науково обґрунтованих стратегій сталого землекористування у післявоєнний період.

З огляду на результати дослідження рекомендовано використовувати ці методичні напрацювання як основу для створення практичних інструментів і державних програм у сфері екологічної безпеки та аграрного відновлення. Їхня реалізація сприятиме інтеграції України у глобальний простір інноваційних технологій і сталого розвитку.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Benedix, G. K., Norman, C. J., Bland, P. A., Towner, M. C., Paxman, J., & Tan, T. (2018). Automated detection of Martian craters using a convolutional neural network. 49th Lunar and Planetary Science Conference. Retrieved from <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2018/pdf/2202.pdf>
2. Yao, J., et al. (2018). "Adaptive Hough Transform for Circle Detection." IEEE Transactions on Image Processing, 27(6), 2720-2733.
2. Kussul, N., Drozd, S., Yailymova, H., Shelestov, A., Lemoine, G., & Deininger, K. (2023). Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine: An integrated approach using statistical indicators and machine learning. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 31, 100976. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100976>
3. YOLOv5 Architecture: Jocher, G., et al. (2020). "YOLOv5 Repository Documentation." GitHub, ultralytics/yolov5.
4. Wang, C., et al. (2020). "YOLOv5: Improved Object Detection Architecture." arXiv preprint arXiv:2004.10934.
5. Адамів С. Руйнування ґрунтового покриття внаслідок ведення військових дій. Scientific Collection «InterConf». 2024 (198). С. 369–375. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/6044>
6. Балюк С. А. Оцінка впливу війни на чорноземі як передумова відновлення їхньої родючості [Електронний ресурс] / С. А. Балюк // Агропортал. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://agroportal.ua/blogs/ocinka-vplivu-viyni-na-chornozemi-yak-peredumova-vidnovlennya-jihnoji-rodyuchosti>.
7. В Україні заміновано майже 139 тисяч кв. км території — Шмигаль [Електронний ресурс] // Суспільне. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://suspilne.media/893279-v-ukraini-zaminovano-majze-139-tisa>.
8. Ґрунтові деградації і технології відтворення родючості ґрунтів: навчальний посібник для підготовки фахівців ОС "Магістр" зі спеціальності 201 "Агрономія / В. О. Забалуєв, А.Д.Балаєв, О.Л.Тонха, О.В.Піковська; За ред. В. О. Забалуєва. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2023. 240 с. <https://dglb.nubip.edu.ua/handle/123456789/10634>.
9. ДСТУ 10.3.81-6-2001. Якість ґрунту. Відбір проб. – К. : Держспоживстандарт України, 2002.– 17 с.
- 10.Методика визначення розміру шкоди, завданої землі, ґрунтам внаслідок надзвичайних ситуацій та/або збройної агресії та бойових дій під час дії воєнного стану [Електронний ресурс] // Верховна рада. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0406-22#n14>.
- 11.Моніторинг якості ґрунтів /[Булигін С.Ю., Вітвіцький С.В., Буліний О.В., Тонха О.Л.] Підручник. К.: НУБіП України, 2019. 449 с.
- 12.Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення: монографія; за ред. С. А. Балюка, А. В. Кучера, М. І. Ромащенко. Київ: Аграрна наука, 2024. 340 с.