МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА

Факультет геології, географії, рекреації і туризму

Кафедра фізичної географії та картографії

До захисту допустити
Зав. кафедри _____доцент Анатолій БАЙНАЗАРОВ
«____»_____2025 р.

ГЕОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ ПОШКОДЖЕНЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ РАДАРНИХ ДАНИХ (НА ПРИКЛАДІ БАХМУТСЬКОГО РАЙОНУ ДОНЕЦЬКОЇ ОБЛАСТІ)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Виконав: студент 2-го курсу д.ф.з,о.
групи ГГ- 21
спеціальність: 106 Географія
освітня програма: Географія
Артем Сергійович КОСТИЦЬ
Науковий керівник:
ст.викл. Владислав ПОПОВ

Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою
_____
_____ *Голова ЕК Валентина РЕДІНА*
_____ *Секретар ЕК Тетяна БУЛГАКОВА*
«_____»_____2025 р.

Харків – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП……. 4

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПОПЕРЕДНЬОГО ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ РАДАРНИХ ДАНИХ ДЛЯ ГЕОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЗОКРЕМА, ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ПРИРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ…….. 7

1.1. Світовий досвід застосування радарних даних в моніторингу природного середовища…….. 7

1.2. Географічні дослідження порушень, спричинених бойовими діями, за методами ДЗЗ в світовому і вітчизняному досвіді …… 20

1.3. Узагальнення світового та вітчизняного досвіду у використанні радарних даних та ДЗЗ для географічних досліджень…… 27

РОЗДІЛ 2. ТЕРИТОРІЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ……... 32

2.1. Характеристика території Бахмутського району та огляд типових порушень сільськогосподарських угідь, внаслідок бойових дій …… 32

2.2. Характеристика радарних даних та SAR-технології. 42

2.3. Можливості і особливості амплітудних даних SAR для географічного аналізу стану сільськогосподарських угідь ……. 52

2.4. Методика обробки та аналізу радарних даних для оцінки пошкоджень сільськогосподарських угідь…… 59

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПОРУШЕНЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ НА ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ДАНИМИ SAR……... 72

3.1. Виявлення і оцінка пошкоджень на території дослідження за обраною методикою ……... 72

3.2. Загальні риси порушень середовища та географічна оцінка впливу воєнних дій на територію за даними SAR…….. 84

3.3. Верифікація результатів географічного аналізу за допоміжними джерелами…… 88
3.4. Географічний аналіз впливу воєнних дій на сільськогосподарські угіддя за радарними даними …….. 95
ВИСНОВКИ……..... 98
СПИСОК ВИКОРИСАНИХ ДЖЕРЕЛ…….. 101

ВСТУП

Актуальність. Російська збройна агресія проти України, що розпочалася у 2014 році та набула повномасштабного характеру у 2022 році, спричинила масштабні екологічні, економічні та соціальні наслідки. Однією з найбільш постраждалих сфер стало сільське господарство, особливо у східних регіонах країни, де бойові дії призвели до значних пошкоджень сільськогосподарських угідь, деградації ґрунтів, мінування територій та руйнування сільськогосподарської інфраструктури.

За оцінками Міністерства аграрної політики та продовольства України, станом на 2025 рік унаслідок повномасштабної війни втрачено або пошкоджено близько 25 % сільськогосподарських угідь країни, що становить орієнтовно 10,7 мільйона гектарів із загальної площі аграрних земель України. Такі втрати мають безпосередній вплив на продовольчу безпеку держави, порушують стійкість аграрного сектору та створюють загрози для навколишнього природного середовища.

Україна посідає провідні позиції в Європі за обсягами родючих ґрунтів і потенціалом аграрного виробництва, тому відновлення сільськогосподарських угідь після бойових дій є питанням не лише економічного, а й національного значення. Для ефективного планування відновлення потрібне точне та своєчасне виявлення пошкоджених ділянок, оцінка ступеня деградації ґрунтів і визначення територій, що залишаються небезпечними для використання.

У цьому контексті радарні дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) відіграють ключову роль, оскільки забезпечують можливість моніторингу територій незалежно від погодних умов і освітленості. На відміну від оптичних знімків, радарні дані дозволяють отримувати інформацію навіть крізь хмарність та дим, що є особливо важливим у зонах активних або нещодавніх бойових дій. Використання супутникових радарних даних Sentinel-1 та інших місій дає змогу

виявляти зміни структури поверхні, пошкодження полів, утворення вирв, траншей та інших антропогенних слідів війни.

Досліджувана територія – Бахмутський район Донецької області – є одним із найбільш постраждалих регіонів від бойових дій, що супроводжувалися масштабними руйнуваннями та тривалими артилерійськими обстрілами. Саме тому ця територія є показовим прикладом для розроблення та апробації методики географічного аналізу пошкоджень сільськогосподарських угідь із використанням радарних даних.

Отримані результати сприятимуть формуванню науково обґрунтованих підходів до відновлення аграрного виробництва, підвищення ефективності моніторингу деградованих земель та підтримці прийняття управлінських рішень у сфері відновлення територій, постраждалих від воєнних дій.

Об’єктом дослідження є сільськогосподарські угіддя Бахмутського району Донецької області, які зазнали порушень через бойові дії.

Предметом є зміни територій сільськогосподарських угідь Бахмутського району, які спричинені внаслідок ведення воєнних дій, визначені на основі використання радарних даних.

Мета роботи - виявити, оцінити та провести географічний аналіз пошкоджень сільськогосподарських угідь унаслідок воєнних дій на прикладі Бахмутського району з використанням радарних даних.

Отримані результати сприятимуть формуванню науково обґрунтованих підходів до відновлення аграрного виробництва, підвищення ефективності моніторингу деградованих земель та підтримці прийняття управлінських рішень у сфері відновлення територій, постраждалих від воєнних дій.

Завдання:

1. Проаналізувати світовий та вітчизняний досвід використання радарних даних у географічних дослідженнях і моніторингу впливу бойових дій на довкілля;

2. Охарактеризувати природно-географічні умови Бахмутського району та визначити типові види пошкоджень сільськогосподарських угідь;

3. Обґрунтувати вибір радарних даних (SAR) та їх придатність для аналізу стану агроландшафтів;

4. Розробити та реалізувати методику обробки SAR-даних для виявлення пошкоджень і просторової оцінки порушень з подальшою верифікацією результатів аналізу;

5. Узагальнити результати та надати географічну оцінку впливу воєнних дій на сільськогосподарські угіддя досліджуваної території.

Методи дослідження, які використовувалися у роботі: картографічний, геоінформаційний, метод дешифрування знімків, аналіз попереднього досвіду в вигляді літературних публікацій за тематикою «дослідження поверхні Землі за радарними знімками», статистичний аналіз площ за матеріалами дистанційного зондування, методи ГІС обробки даних, метод візуального аналізу радарних даних, класифікація супутникових знімків, метод векторизації растрових даних, метод підрахунку площ за векторними полігонами.

Обрана тематика дослідження є логічним продовженням бакалаврської кваліфікаційної роботи здобувача на тему «Гіперспектральний аналіз порушень сільськогосподарських угідь, спричинених бойовими діями (на прикладі Бахмутського району Донецької області)», продовжує і доповнює виконаний доробок.

Дана кваліфікаційна робота складається з вступу, 3 розділів, висновків та списку із 71 використаних джерел). Обсяг роботи становить 108 сторінок друкованого тексту.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПОПЕРЕДНЬОГО ДОСВІДУ ЗАСТОСУВАННЯ РАДАРНИХ ДАНИХ ДЛЯ ГЕОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЗОКРЕМА, ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ПРИРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ

1.1. Світовий досвід застосування радарних даних в моніторингу природного середовища

У сучасних умовах глобальних екологічних змін та антропогенного навантаження на довкілля особливого значення набувають дистанційні методи зондування Землі для моніторингу природного середовища. Ці методи дають можливість безпосередньо зазирнути у важкодоступні або небезпечні місця нашої планети для їх вивчення. Також перевагою таких технологій є можливість охоплювати великі площі для дослідження, добираючи оптимальні платформи та сенсори відповідно до цільової інформації.

Платформи дистанційного зондування Землі класифікуються за типом носія на космічні, авіаційні, безпілотні та наземні [1]. Космічні платформи забезпечують глобальне й регіональне охоплення територій та використовуються для систематичного спостереження за станом природного середовища. Авіаційні платформи здійснюють зйомку з літаків або вертольотів, надаючи дані високої деталізації для середніх за розміром територій [2]. Безпілотні літальні апарати використовуються для локальних досліджень і забезпечують високу просторову роздільну здатність, оперативність та гнучкість у плануванні зйомок. Наземні платформи слугують для калібрування, валідації та уточнення даних, отриманих із повітряних або космічних носіїв. Кожен тип платформи відрізняється висотою зйомки, масштабом охоплення, просторовою роздільною здатністю та періодичністю спостережень. Космічні системи забезпечують широке охоплення, тоді як авіаційні та безпілотні – детальні локальні дослідження. Наземні засоби дозволяють перевіряти

достовірність дистанційних спостережень. Поєднання різних типів платформ забезпечує комплексність моніторингу природного середовища на різних рівнях просторової організації.

Сенсори дистанційного зондування поділяються на пасивні та активні. Пасивні сенсори реєструють природне відбиття або випромінювання об’єктів, що дозволяє оцінювати їхні спектральні властивості. До них належать панхроматичні, мультиспектральні, гіперспектральні та теплові інфрачервоні сенсори, які забезпечують отримання даних у різних діапазонах електромагнітного спектра. Активні сенсори, навпаки, самостійно випромінюють сигнал і фіксують його відбиття від поверхні, що дозволяє здійснювати спостереження незалежно від часу доби чи погодних умов [3]. Основними типами активних сенсорів є радарні системи з синтетичною апертурою (SAR), лідарні системи (LiDAR) та гідроакустичні сенсори (сонари), які застосовуються для дослідження рельєфу, рослинного покриву та підводних об’єктів [4]. Такий поділ забезпечує комплексність підходів у моніторингу природних процесів і підвищує точність геопросторового аналізу.

У моніторингу природних територій добре зарекомендували себе радарні дані. Однією з причин їхньої популярності є те, що на якість таких даних не впливають світлові умови та погодні фактори. У світі вже накопичено значний досвід застосування радарних даних для вивчення різних природних компонентів – лісів, водних об’єктів, сільськогосподарських угідь та рельєфу. Завдяки активним місіям, таким як Sentinel-1, RADARSAT, ALOS PALSAR, TerraSAR-X, науковці отримують детальні дані про структуру поверхні Землі та її зміни [5]. Радарні знімки дозволяють оцінювати щільність і біомасу лісів, виявляти вирубки та пошкодження лісових масивів. Для водних об’єктів радарні дані ефективно використовуються у моніторингу паводків, підтоплень та змін берегової лінії.

Радарне зондування Землі посідає важливе місце в комплексному моніторингу природного середовища, забезпечуючи отримання достовірної

інформації незалежно від погодних умов чи освітленості. У лісовому господарстві воно дає змогу визначати щільність і структуру деревостану, оцінювати біомасу, виявляти вирубки та пошкоджені ділянки, що сприяє раціональному управлінню лісовими ресурсами. Для водних об’єктів радарні дані використовуються з метою відстеження меж водойм, динаміки рівнів води, затоплень і змін прибережних зон, що особливо актуально під час стихійних явищ. У сільському господарстві такі технології дозволяють контролювати стан посівів, вологість ґрунтів і площі обробітку, забезпечуючи ефективне управління агровиробництвом [6]. Крім того, інтерферометричні методи радарного зондування дають можливість фіксувати навіть незначні зміни рельєфу, деформації чи зсуви земної поверхні з високою точністю. Таким чином, досвід використання радарних технологій у світовій практиці доводить їхню універсальність і значний потенціал у дослідженні лісових, водних та сільськогосподарських територій, а також у виявленні процесів, які значно впливають на них.

Таким чином враховуючи переваги радарних даних їх часто використовують для дослідження лісовкритих площ на територіях з постійною хмарністю. Наприклад в 2015 році за на основі радарних даних було проведено дослідження по оцінці лісового покриву в Ірландії. Метою було визначення потенціалу використання радіолокаційних даних L-діапазону (SAR) для визначення та картографування лісового покриву у фрагментованих ландшафтах Ірландії, а також порівняти точність таких оцінок із національними, європейськими та глобальними продуктами лісового покриву; зокрема робота передбачає перевірку можливостей супутникових радарних даних ALOS PALSAR для створення карт лісового покриву в умовах низької лісистості та високої фрагментації, порівняння ефективності алгоритмів машинного навчання «випадковий ліс» (Random Forest) і «надзвичайно рандомізовані дерева» (Extremely Randomized Trees) для класифікації лісових і нелісових територій, а також оцінку точності радарних карт відносно даних національних

інвентаризацій (Forestry2010, Prime2, NFI), загальноєвропейської Forest Map 2006 і глобального продукту Global Forest Change [7].

Дослідження перевіряє методології визначення лісового покриву у двох контрастних ірландських графствах – Лонгфорд і Слайго – щоб протестувати стабільність підходів у різних фізико-географічних умовах. Вибір ділянок із 7,7% та 11,2% лісистості концентрує увагу на фрагментованих ландшафтах із дрібномозаїчною структурою деревного покриву [8]. Ядром дистанційної інформації виступає ALOS PALSAR у L-діапазоні з подвійною поляризацією HH/HV та режимом FBD, що є оптимальним для проникнення сигналу.

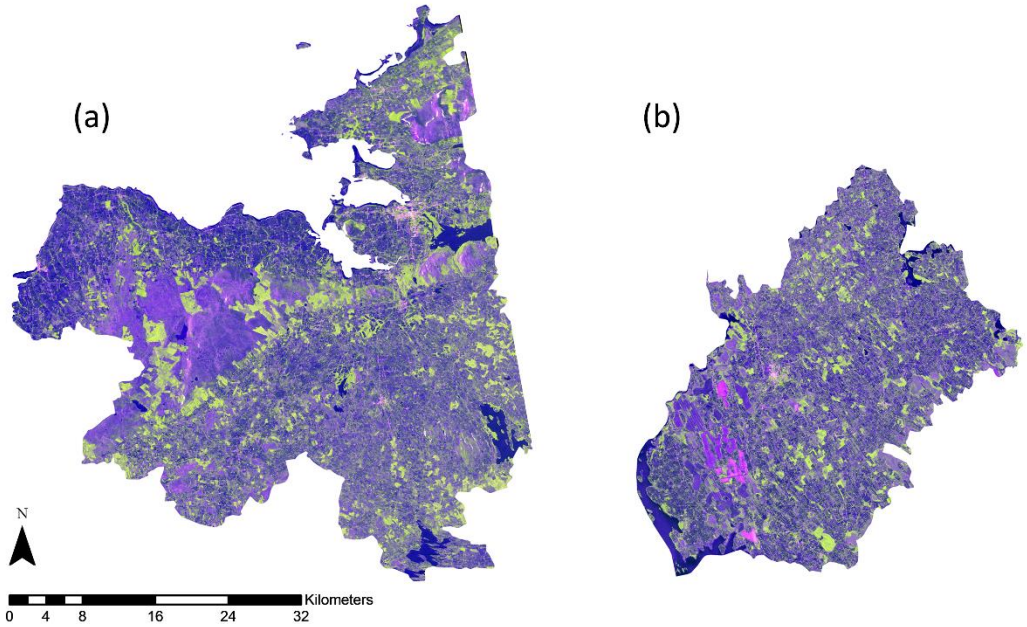

Рис. 1.1. Композитні знімки у комбінації false colour PALSAR (червоний – зворотне розсіювання HH, зелений – зворотне розсіювання HV, синій – співвідношення HH/HV) для територій Слайго (a) та Лонгфорда (b) [7]

Зйомка червня 2010 року підпорядкована систематичній стратегії місії і мінімізує сезонну варіабельність. Попередня обробка включає спекл-фільтр де Гранді, радіометричну й геометричну калібровку та ортокорекцію за DEM 10 м, що забезпечує коректні значення яскравості γ°. Топографічні спотворення відсутні в низинному Лонгфорді й мінімальні в орографічно складнішому Слайго, де замасковано близько 0,2% площі. Навчальні вибірки збалансовані за

класами і охоплюють 2 378 пікселів у Лонгфорді та 7 890 у Слайго, що знижує ризики зміщення під час тренування. Для контролю генералізації застосовано п’ятикратну перехресну валідацію, яка пом’якшує випадковість розбиття даних. Класифікація здійснюється для фільтрації шумів та класифікації інформації зі знімку за двома методами - Random Forest та Extremely Randomized Trees, придатними для нелінійних залежностей і змішаних предикторів [9, 10]. До списку предикторів увійшли інтенсивності поляризацій HH та HV, їхнє співвідношення HV/HH, а також допоміжні шари рельєфу (висота, схил) і ґрунтово-геологічні характеристики. Подальша класифікаційна фільтрація за п’ятьма рівнями зв’язності видаляє дрібні об’єкти, не сумісні з прийнятим порогом мінімальної площі лісу. Просторова гармонізація різних джерел (ITM, векторизація, розчинення полігонів, обрізка до спільної зони покриття) забезпечує коректне зіставлення карт. Принципова ж різниця між наборами полягає в тому, що SAR, GFC, JRC і NFI відображають деревний/лісовий покрив [11], тоді як Forestry2010 і Prime2 репрезентують землекористування. Незалежна перевірка правильності спирається на наземні точки NFI, LUCAS та обстеження корінних лісів, формуючи репрезентативний еталон для бінарного поділу «ліс»/»не ліс». L-діапазон демонструє високу придатність до розмежування лісу в умовах фрагментації, причому канал HV зазвичай виявляється інформативнішим за HH. Допоміжні шари дають другорядний, але стабільно позитивний внесок у точність, особливо в рельєфно контрастному Слайго. Використання Prime2 як об’єктно-орієнтованої просторової «сітки» для заселення результатів класифікації зменшує завищення площ за рахунок дрібних фрагментів і лінійних насаджень. Автори прямо підкреслюють обмеження, серед яких потенційне сплутування чагарників і живоплотів із лісом, часові зсуви між джерелами та залишкові ефекти спекл шуму. Надійність підходу підсилюється суворою процедурою узгодження масштабів і проєкцій, прозорими налаштуваннями алгоритмів і відтворюваною схемою валідації. У підсумку ця методична рамка, що поєднує L-SAR [12], ансамблеві дерева та

об’єктну гармонізацію з національними реєстрами, демонструє практичну придатність для точного картографування лісів у складних, фрагментованих ландшафтах.

Підхід із L-діапазонним SAR продемонстрував високу придатність для картографування лісів у фрагментованих ландшафтах, забезпечивши узгоджені результати для двох контрастних регіонів Ірландії. Класифікатори Random Forest і Extremely Randomized Trees показали порівнянну ефективність (загальна точність 98,1–98,5%; κ=0,96–0,97), тож вибір між ними не є критичним. Найінформативнішим предиктором виявився канал HV, за яким ішли HH і співвідношення HV/HH, тоді як допоміжні дані (рельєф, ґрунти, підґрунтя) додавали переважно 2–4% до точності, з помітнішою користю висоти у гірському Слайго. Післякласифікаційна фільтрація зменшувала «шум» і дрібні фрагменти, що приводило до нижчих оцінок площі, але стабільно підвищувало загальну точність. Заселення результатів у об’єктно-орієнтовану базу Prime2 додатково скорочувало оцінену площу лісів і часто давало найвищі значення точності серед SAR-карт. У порівнянні з реєстрами національного рівня (Forestry2010, Prime2, NFI) глобальні та панєвропейські продукти (GFC, JRC Forest Map 2006) мали нижчу узгодженість і схильність до надмірної фрагментації, що підтверджує обмеженість їх використання для національної звітності. За підсумком, L-SAR у поєднанні з ансамблевими деревами та об’єктною гармонізацією формує відтворювану й надійну методичну рамку для точного виділення лісів за умов низької лісистості. Отримані результати підтвердили переваги інтеграції радарних даних в систему офіційного моніторингу лісів.

Також радарні дані є потужним інструментом дослідження водних об’єктів і підтоплюваних територій. Дана інформація може бути доволі цінною в контексті загального напрямку наукової роботи, так як більшість військових фортифікацій заглиблюються в ґрунт і можуть накопичувати в собі воду, що спростить їх виявлення за використання радарних даних [13]. Схожими

напрацювання займалися науковці E. Goumehei та V. Tolpekin. У своїй науковій роботі вони займалися виявленням поверхневих водних об’єктів на основі радарних даних за допомогою контекстної класифікації на основі складного розподілу Вішарта [14].

У роботі використовувалися поляриметричні SAR-дані Sentinel-1 у форматі SLC, що зберігають повну фазову інформацію сигналу та забезпечують детальний аналіз характеристик зворотного розсіювання водних об’єктів [15]. Набори знімків отримувалися за різних кутів падіння хвилі, що дозволило оцінити стабільність методики під час зміни умов зйомки. Повна поляриметрія з каналами HH, HV, VH та VV надала можливість визначити різні механізми взаємодії сигналу з поверхнею. Оптичні знімки високої роздільності застосовувалися для перевірки достовірності результатів. Також використовували наявні векторні шари гідрографії для чіткого положення меж водойм. Попередня обробка включала орбітальну корекцію, радіометричну калібрацію та приведення даних до коефіцієнтів зворотного розсіювання [16]. Було враховано усунення систематичних похибок і корекцію впливу рельєфу для забезпечення стабільності аналізу.

Методологічною основою дослідження стала контекстна класифікаційна модель Complex Wishart Markov Random Field (WMRF), що поєднує статистичний аналіз даних і просторову взаємозалежність між пікселями [17]. Wishart-розподіл застосовувався для моделювання повної коваріаційної матриці поляриметричних компонент, відображаючи їхні внутрішні зв’язки. Оцінювання параметрів здійснювалося методом максимальної правдоподібності, що забезпечило статистичну обґрунтованість класифікації. У моделі враховувалася регуляризація для контролю ступеня просторової згладженості. Оптимізація енергетичної функції здійснювалася за допомогою алгоритму Ітераційного Обумовленого Моделювання, який ітеративно знижував чутливість класифікації до збіжного стану. Такий підхід дає змогу ефективно усувати поодинокі шумові пікселі, властиві спекл-ефекту, що

притаманний SAR-знімкам [18]. Особливу увагу було приділено прибережним ділянкам, де інші алгоритми зазвичай утворюють значну кількість хибних класифікацій. Модель демонструвала здатність чітко відокремлювати водні поверхні навіть у випадках їх схожості з темною рослинністю та перезволоженими угіддями. Для підвищення достовірності було проведено порівняльне оцінювання з GMLC (Гауссова класифікація максимальної правдоподібності) та WMLC (Класифікація максимальної правдоподібності Вішарта) без просторового контексту та пороговим методом у поєднанні з медіан-фільтром. Усі моделі проходили уніфіковані етапи навчання і тестування. Для оцінювання якості використовували показники precision, recall та F-score, а також аналіз похибок класифікації у складних зонах [19]. Модель WMRF оцінювала ймовірнісну приналежність кожного пікселя до класу на основі поєднання спектральних та контекстних характеристик. Застосування марковського підходу дозволило мінімізувати надмірне «перекласифікування» дрібних ділянок, характерне для методів без просторового аналізу. Було виконано статистичну перевірку впливу різних параметрів регуляризації на остаточну точність класифікації. Враховувалися також зміни когерентності сигналу, що впливають на надійність поляриметричного аналізу в умовах водної турбулентності. Було встановлено, що оптимізація ймовірнісних оцінок при кожній ітерації є критично важливою для формування однорідних водних масивів без фрагментації. Дослідники наголосили, що контекстна модель показує найбільшу вигоду саме в умовах низького контрасту між класами [20].

Результати дослідження показали, що метод WMRF забезпечив найвищу точність визначення водних поверхонь із F-score на рівні близько 0,95, що свідчить про низький рівень хибно виявлених водних пікселів. Recall залишався високим і стабільним, що підтвердило здатність методу повністю вилучати водні об’єкти зі знімка. Для порівняння, Gaussian MLC показав лише близько 0,67 за F-score, а Wishart MLC – приблизно 0,88. Пороговий метод працював гірше в межових зонах і створював значні артефакти на переходах між класами.

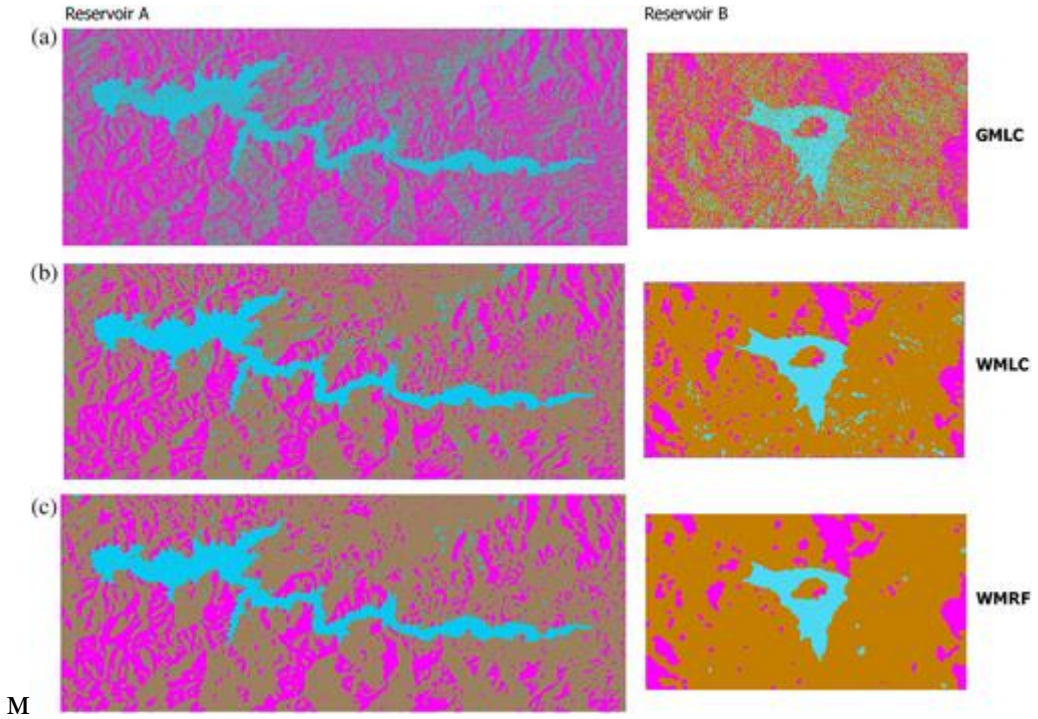

Рис. 1.2. Результати класифікації для моделей (a) GMLC, (b) WMLC та (c) WMRF [20]

Просторова цілісність водних полігонів значно покращилася завдяки марковському моделюванню. Модель виявила високу стійкість до зміни кутів падіння сигналу та умов зйомки. Спостерігалося помітне зменшення шумових артефактів на відкритих водних акваторіях після корекції просторових залежностей. Візуальний аналіз підтвердив точність і плавність берегових контурів. Запропонована методика виявила потенціал для оперативного моніторингу підтоплень і оцінки гідрологічної динаміки. Автори зауважили можливість автоматизації процесу для систем раннього оповіщення. Контекстний аналіз довів свою ефективність у складних наземних умовах. Отримані результати свідчать про значний практичний потенціал моделі для підвищення точності автоматизованої інтерпретації радарних зображень природних водних систем. Таким чином, дослідження забезпечує важливий внесок у вдосконалення технологій виділення водних об’єктів за даними поляриметричного SAR і підтверджує перспективність застосування контекстних статистичних моделей для гідрологічного моніторингу.

Дослідження сільськогосподарських угідь за допомогою радарних даних полягає в тому, що радарна (SAR) зйомка надає унікальну інформацію про стан посівів, вологість ґрунту та структуру рослинності, незалежно від хмарності та часу доби [21]. Це дає змогу проводити регулярний і точний моніторинг сільськогосподарських культур, сприяючи ефективнішому управлінню ресурсами та підвищенню врожайності [22]. Використання радарних даних є перспективним інструментом для точного землеробства та оцінки стану агроландшафтів.

Гарним прикладом застосування таких даних є дослідження потенціалу радіолокаційних даних Sentinel-1 для оцінки параметрів ґрунту та злакових культур за радарними даними у напіваридних умовах Тунісу (Рисунок 1.3.).

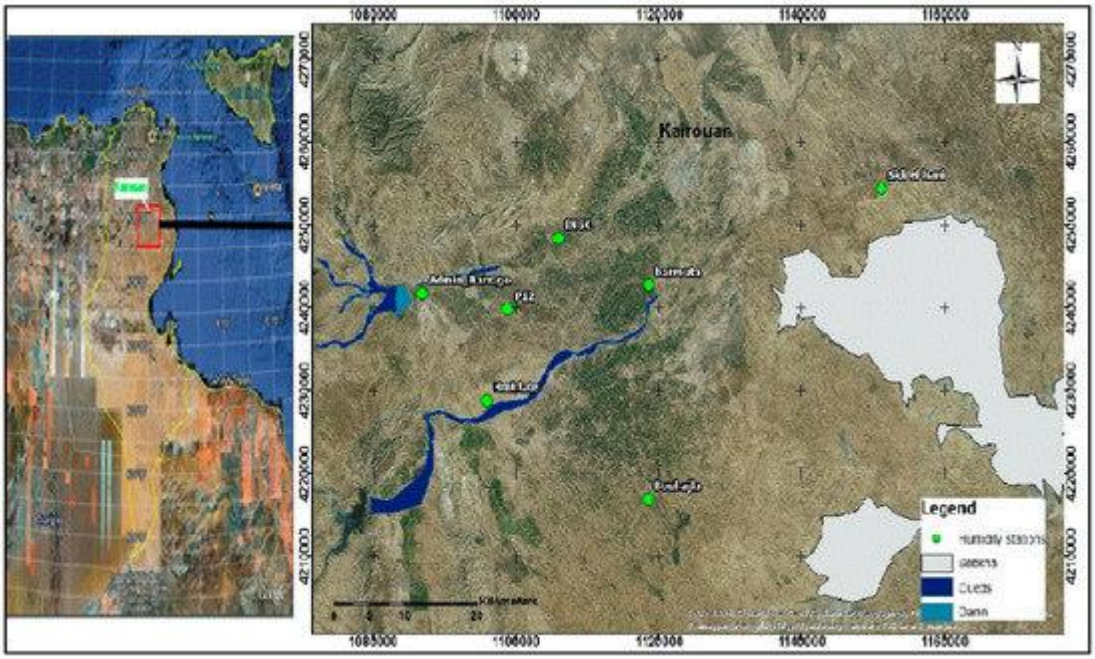

Рис. 1.3. Території дослідження

Дослідження проводилося на рівнині Кайруан, що характеризується середземноморським кліматом з річною кількістю опадів близько 300 мм і домінуванням сільськогосподарських угідь. Використано десять сцен Sentinel-1 у режимі IW з просторовим розрішенням 10 м і подвійною поляризацією VV/VH, отриманих у 2015–2017 рр. Для доповнення радарних даних застосовано сім знімків Landsat-8, попередньо скоригованих за атмосферними

ефектами за допомогою алгоритму LEDAPS [23]. Наземні вимірювання здійснювалися на понад двадцяти репрезентативних ділянках площею 2–5 га, що охоплювали голий ґрунт і поля зі злаковими культурами на різних стадіях росту. Вимірювалися вологість ґрунту (датчиками Theta Probe на глибині 5 см), шорсткість поверхні, листковий індекс площі (LAI) та висота рослин (H) [24]. Додатково діяла мережа з семи автоматичних станцій, які фіксували вологість кожні 3 години. Значення вологості змінювалися в широких межах – від 3,9 до 45 % об'єму, що відображає значну сезонну мінливість опадів. Параметр шорсткості визначали за допомогою профілометра, розраховуючи середньоквадратичну висоту (Hrms = 0,56–4,55 см) та довжину кореляції (L = 1,96–13,14 см).

Оброблення радарних зображень здійснювалося через послідовні етапи: видалення теплового шуму, радіометричне калібрування, корекція рельєфу за SRTM DEM і приглушення спеклу фільтром Lee [25]. Для дослідження зв'язку між вегетаційними параметрами та оптичними індексами використано експоненційну модель NDVI–LAI (коефіцієнт згасання k = 0,96, R^2 = 0,79). Аналіз радарних сигналів проводився окремо для трьох класів NDVI (< 0,25; 0,25–0,5; > 0,5), що дозволило мінімізувати вплив неоднорідності рослинного покриву. Для оцінки впливу вологості та шорсткості на зворотне розсіяння було розроблено емпіричну модель з лінійною залежністю від вологості й логарифмічною – від Hrms. Для полів із рослинністю застосовано напівемпіричну модель Water Cloud Model (Attema & Ulaby, 1978), у якій NDVI виступає параметром, пов'язаним з оптичними властивостями покриву. Обидві моделі пройшли калібрування на частині вибірки (45–110 полів) і подальшу валідацію на незалежних даних. Для Water Cloud Model емпіричні коефіцієнти визначено як A = 0.06 і B = 0.42. Дослідження проводилося для кількох класів вологості (mv ≤ 10 %, 10–20 %, > 20 %), що дозволило оцінити стабільність моделей у різних гідрологічних умовах.

Аналіз показав тісну кореляцію між NDVI та LAI: при LAI ≈ 3 м²/м² індекс NDVI досягає рівня 0,78, після чого спостерігається насичення. Чутливість радарних сигналів до вологості зменшується із ростом рослинного покриву. Для VV-поляризації вона становить 0,27 дБ/вол.% при NDVI < 0,25 і лише 0,12 дБ/вол.% при NDVI > 0,5. VV-сигнали демонструють вищу стабільність і точність порівняно з VH, оскільки останні більшою мірою піддаються впливу об'ємного розсіяння в рослинному шарі. Кореляція між вологістю й сигналом істотно падає при густій вегетації. Для голих ґрунтів встановлено сильний зв'язок між зворотним коефіцієнтом і Hrms (коефіцієнт r > 0,7 при mv < 10 %), що відповідає зміні амплітуди сигналу на 6 дБ. У міру збільшення вологості залежність послаблюється через згладження (загрублення, в певному сенсі) мікрорельєфу. Для VV-поляризації спостерігається спад сигналу зі збільшенням LAI, що зумовлено ослабленням відбиття від ґрунту. Для VH-поляризації ефект менш виражений, оскільки зниження ґрунтового компонента частково компенсується зростанням об'ємного розсіяння. Аналіз за параметром H (висотою рослин) підтвердив подібну закономірність: у VV-поляризації сигнал зменшується зі збільшенням висоти, а у VH – навпаки, посилюється. Побудована емпірична модель для відкритого ґрунту продемонструвала RMSE = 1,27 дБ (VV) та 1,23 дБ (VH), що свідчить про високу достовірність опису. Калібровані параметри становлять: $\alpha = 0{,}17$, $\beta = 3{,}25$, $\delta = -15{,}06$ для VV та $\alpha = 0{,}13$, $\beta = 1{,}88$, $\delta = -23{,}01$ для VH. Валідація Water Cloud Model показала RMSE = 0,84 дБ і зміщення 0,08 дБ при широкому діапазоні NDVI (0,14–0,69) та вологості (6,4–37 %). VV-поляризація виявилася більш придатною для оцінки вологості, тоді як VH відображає геометричні особливості посівів [26, 27].

Робота довела високий потенціал Sentinel-1 для комплексного моніторингу стану ґрунту та рослинності у сільськогосподарських регіонах. Найбільшу інформативність має VV-поляризація, придатна для оцінки вологості відкритих або слабковегетованих ділянок. Зі збільшенням NDVI чутливість до ґрунтових параметрів знижується, однак модель Water Cloud

ефективно відтворює взаємозв’язки між вологістю, рослинністю та радарним відбиттям. Проста емпірична модель для оголеного ґрунту забезпечує похибку менше 1,5 дБ, що підтверджує її придатність для операційного картування. Комбінація радарних і оптичних даних дозволяє суттєво підвищити точність визначення LAI та вологості. Отримані емпіричні параметри можуть бути використані для калібрування моделей в інших агроекосистемах. Таким чином, Sentinel-1 підтверджує свій статус як надійного джерела інформації для моніторингу відкритих і оброблюваних ґрунтів, особливо в умовах частого хмарного покриву та обмежених оптичних спостережень [28].

Отже, узагальнюючи результати аналізу, можна зробити висновок, що радарні дані є одним із найефективніших інструментів сучасного географічного моніторингу природного середовища. Їх застосування охоплює широкий спектр напрямів – від визначення структури та динаміки лісового покриву до виявлення водних об’єктів і оцінки стану сільськогосподарських угідь. Представлені приклади доводять високу точність і стабільність радарних методів незалежно від погодних умов, освітленості чи хмарності. Інтеграція SAR-даних із оптичними знімками та використання сучасних алгоритмів машинного навчання забезпечують отримання комплексної й достовірної інформації про стан природних систем. Отримані результати підтверджують перспективність використання радарного зондування в екологічному моніторингу та управлінні територіями. Таким чином, радарні технології відіграють ключову роль у розвитку геоінформаційних досліджень і забезпечують новий рівень точності в аналізі просторових процесів.

1.2. Географічні дослідження порушень, спричинених бойовими діями, за методами ДЗЗ в світовому і вітчизняному досвіді

У сучасних умовах зростання військових конфліктів у різних регіонах світу особливого значення набувають дослідження їхніх наслідків для природного середовища. Збройні дії спричиняють масштабні порушення ландшафтної структури, руйнування інфраструктури, деградацію ґрунтового покриву, втрату біорізноманіття та зміну гідрологічного режиму. Традиційні польові методи дослідження таких процесів часто обмежені через небезпеку доступу до територій та великі просторові масштаби впливу, тому дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) стає незамінним інструментом для оперативного й безпечного збору інформації про зони руйнувань.

Методи ДЗЗ дозволяють отримувати об’єктивні дані про зміни поверхні, незалежно від доступності ділянки, а для деяких видів – також від погодних умов, освітлення. Завдяки розвитку супутникових платформ, таких як Sentinel, Landsat, TerraSAR-X та PlanetScope, стало можливим систематичне спостереження за зонами конфліктів у динаміці, а використання оптичних і радарних знімків забезпечує виявлення навіть незначних змін у структурі землекористування та рельєфі [29]. У світовій практиці напрацьовано значний досвід застосування таких методів для фіксації наслідків бойових дій у Сирії, Іраку, Афганістані, Нагірному Карабасі та інших регіонах.

Для України, яка з 2014 року перебуває в умовах воєнного протистояння, використання технологій ДЗЗ має особливу актуальність. Дистанційний моніторинг дозволяє оцінювати масштаби руйнувань, аналізувати зміни ландшафтів, визначати зони мінної небезпеки та відстежувати процеси відновлення територій. Поєднання супутникових даних з геоінформаційними системами створює основу для комплексного аналізу наслідків бойових дій і формування сучасних підходів до географічного моніторингу пошкоджених територій України [30].

Одним з таких прикладів є дослідження однієї з найбільших екологічних катастроф за часи повномасштабного вторгнення – теракт на Каховській ГЕС. Після того, як російські війська підірвали Каховську гідроелектростанцію, значні обсяги води з Каховського водосховища попрямували вниз за течією Дніпра, досягаючи Чорного моря. Цей прорив призвів до того, що частина Херсонської області була повністю затоплена, тоді як території, розташовані навколо колишнього водосховища, залишилися без води. Такий контраст спричинив руйнування місцевої аграрної системи: фермерські господарства втратили можливість зрошення, що стало серйозним ударом по економіці регіону, де сільське господарство мало провідну роль [31]. Подібні гідрологічні події показують, як порушення штучних водних систем може спричиняти ланцюгові соціально-економічні та екологічні наслідки, що охоплюють великі регіони.

Дослідження наслідків руйнування провели науковці Ханг Сюй, Сільвен Барбо та Тенг Ван. Вони детально проаналізували прорив Каховської дамби, що стався 6 червня 2023 року, внаслідок чого близько 18 км³ води вилилося у Чорне море, спричинивши велику повінь у нижній течії Дніпра на території Херсонщини [32]. За масштабом пошкоджень і площами затоплення ця подія стала найбільшим екологічним лихом в Україні після аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 році. Для оцінки пошкоджень гідроспоруди та спостереження за змінами у верхній і нижній частинах русла Дніпра дослідники використали дані оптичного дистанційного зондування Землі (Рис. 1.4). Аналіз на основі супутникових спостережень є ключовим методом у кризовій географії, оскільки дозволяє кількісно оцінювати просторові масштаби техногенних і природних подій.

Основу аналізу становили супутникові знімки Sentinel-2 Європейського космічного агентства (ESA) та Landsat-8, розробленого NASA. Ці платформи отримують зображення поверхні у видимому діапазоні довжин хвиль (0,4–0,6 мкм), що дозволяє детально фіксувати структуру ландшафтів та водні об’єкти.

Sentinel-2 забезпечує просторову роздільну здатність 10 м у червоному, зеленому та синьому каналах, тоді як Landsat-8 має роздільну здатність 30 м у подібних спектральних діапазонах [33, 34]. Поєднання цих зображень дало змогу підвищити просторову та часову деталізацію моніторингу, що дозволило точніше оцінити масштаби затоплення та деградації заплавних територій. Такий мультисенсорний підхід відповідає сучасним тенденціям геоінформаційного аналізу, що базується на інтеграції даних із різних супутникових платформ для підвищення достовірності результатів.

За супутниковими спостереженнями, пошкодження дамби розпочалося з лівого берега Дніпра, контрольованого російськими військами (рис. 1.4, B). Внаслідок прориву хвиля затопила десятки населених пунктів, серед яких – м. Олешки, с. Кардашинка, м. Гола Пристань та інші поселення, розташовані в межах десятикілометрової зони заплави (рис. 1.4, C). Одночасно Каховське водосховище, яке забезпечувало роботу гідроелектростанцій, зрошувальних систем і Запорізької АЕС, почало швидко міліти. Його площа, що сягала 24 км у ширину та до 24 м у глибину, зменшувалася щодня, перетворюючи колишнє дно на суху рівнину [35]. Масштаб пошкоджень засвідчив вразливість гідротехнічних споруд у зонах воєнних дій і потребу в системному моніторингу їхнього стану за допомогою супутникових технологій.

Попри значне зниження рівня води, ставок-охолоджувач Запорізької АЕС, завдяки інженерним конструкціям, зумів утримати необхідний об’єм води для стабільної роботи реакторів (Рис. 1.4, D). Отримані супутникові матеріали дозволили не лише візуалізувати масштаби події, але й заклали основу для комплексної оцінки її довгострокових наслідків для гідрологічного балансу, сільського господарства та екологічної безпеки південного регіону України. Такі дані мають стратегічне значення для прогнозування процесів відновлення ландшафтів і формування адаптивних моделей управління природними ресурсами у постконфліктний період.

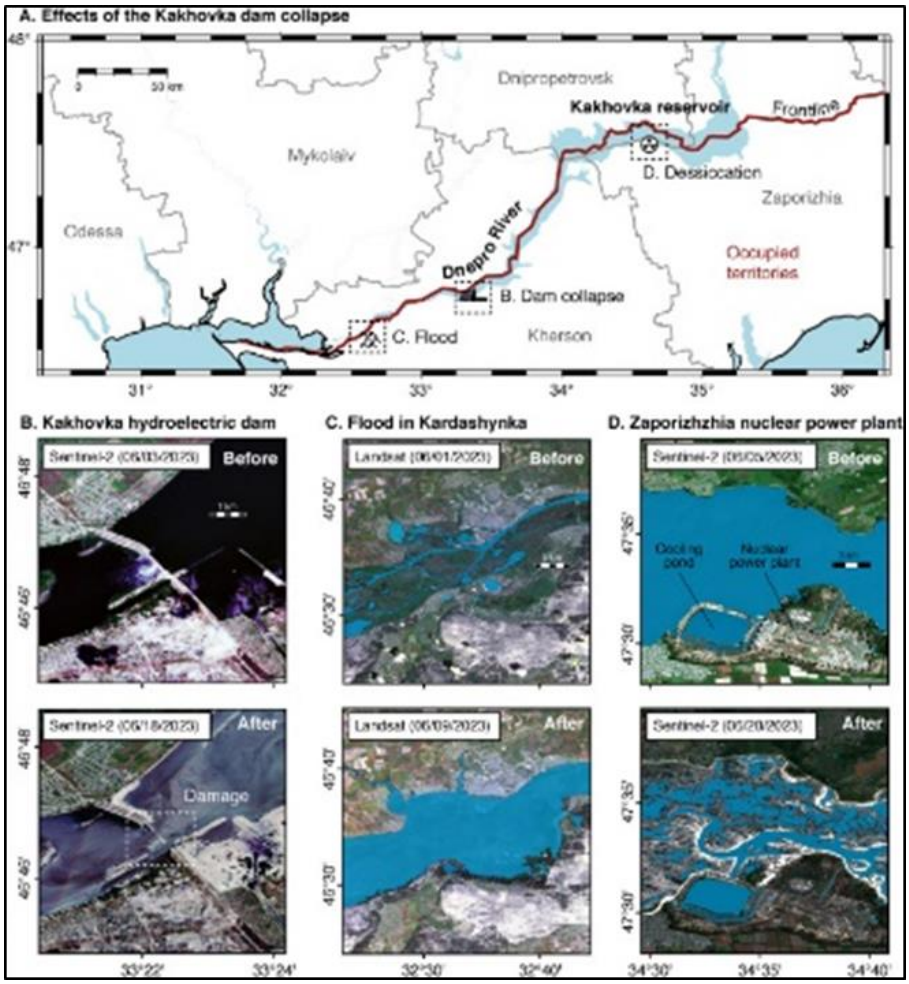

Рис. 1.4. Дистанційне зондування прориву Каховської дамби та його вплив на навколишнє середовище: A) Розташування Каховського водосховища, Каховської ГЕС, Запорізької АЕС вздовж річки Дніпро, Херсонська обл.; B) Зображення Каховської дамби до та після підриву 6 червня 2023 року, на яких видно знищення контрольованої Росією частини дамби; C) Масштаб затоплення нижньої частини русла Дніпра; D) Зображення Каховського водосховища до і після прориву, які демонструють осушення водосховища та наповненість ставка-охолоджувача поруч із Запорізькою АЕС [32]

Також велике зацікавлення викликало дослідження «Інтегрована оцінка порушених екосистем з використанням техніки дистанційного зондування » від авторів О. С. Уруський, С. А. Станкевич, Т. В. Дудар, С. П. Мосов, В. І. Присяжний. Автори підкреслюють, що воєнні дії на території України

спричинили глибокі екологічні зміни, які проявляються у деградації лісових, аграрних і водних систем. Метою дослідження визначено розроблення універсальної методики, що дозволяє кількісно оцінювати ступінь порушення природних комплексів, виявляти зони високого ризику та забезпечувати науково обґрунтоване екологічне планування.

Матеріальною основою роботи стали багатоспектральні супутникові знімки надвисокої просторової розрізненості 0,5 м, отримані з платформ WorldView-1 і WorldView-2 у травні 2020, жовтні 2021 та березні 2022 років [36]. Об'єктом дослідження обрано ділянку автомагістралі Е40 на захід від Києва, яка зазнала істотного воєнного впливу. Для перевірки результатів використовувалися наземні завіркові дані й екосистемні характеристики території. Знімки пройшли попередню обробку – паншарпенінг, атмосферну та радіометричну корекцію, після чого на їхній основі створено тематичні карти земного покриву, розподілу вегетаційних індексів та інтегрованих імовірностей стану екосистем.

Методологічна основа дослідження побудована як багаторівнева система, що поєднує дистанційні спостереження, математичну статистику, тематичне моделювання й геоінформаційний аналіз. У межах підходу виділено послідовні етапи, які формують ядро технології оцінювання. Спочатку визначалися головні екологічні драйвери стану екосистем – щільність рослинного покриву, водний баланс, тип землекористування, рівень урбанізації та ступінь деградації ґрунтів. Для кожного з них були обрані індикатори, що можуть бути кількісно оцінені за допомогою дистанційних даних.

Серед індикаторів основним був VARI (Visible Atmospherically Resistant Index), який відображає інтенсивність рослинного покриву у видимому спектрі та має значення від 0 до 1, де низькі показники менше 0.2 відповідають деградованим ділянкам, а високі понад 0.6 – здоровій рослинності. Для деталізації використовувались також LAI (Leaf Area Index) із діапазоном 0–6 м²/м², LST (Land Surface Temperature) у межах 18–30 °C залежно від сезону, SSM

(Surface Soil Moisture) із характерними значеннями від 0.15 до 0.45, а також NDVI, який використовувався для верифікації VARI зі значеннями 0.3–0.7. Індикатор LC (Land Cover) формувався шляхом класифікації земного покриву за вісьмома класами – штучні поверхні, трав'янисті угіддя, хвойні та листяні ліси, відкриті ґрунти, кам'янисті території, чагарники та водні площі [37].

Після вибору індикаторів проводилося створення часових рядів супутникових спостережень, які дозволили простежити динаміку екосистем у трьох часових зрізах. Автори наголошують, що саме багаточасові дані забезпечують можливість фіксації реальних змін та тенденцій деградації або відновлення природних систем, тоді як одноразові зйомки не відображають сезонних і тривалих процесів.

Наступним кроком стала багаторівнева статистична обробка, у межах якої всі індикатори були приведені до спільної шкали та перетворені у часткові умовні ймовірності певного стану екосистеми. Наприклад, при VARI менше 0.2 імовірність деградації перевищувала 0.8, тоді як при VARI понад 0.6 оцінювалася як стабільна з імовірністю понад 0.9. Для уніфікації даних застосовувалося нормалізоване перетворення шкал і моделювання розподілу показників, після чого відбувалося їх об'єднання у єдину аналітичну систему.

Часткові ймовірності інтегрувалися у спільну модель за допомогою методу об'єднання даних, що базувався на принципах теорії доказів і ймовірнісної конволюції. Такий підхід дозволив створити комбіновану карту стану екосистем, де для кожного пікселя визначався рівень стабільності або ризику. Після цього здійснювався аналіз часової серії інтегрованих карт, що дозволив оцінити просторово-часову динаміку процесів деградації та виділити ділянки зі стабільним, змінним або критично погіршуваним станом. Територія класифікувалася за чотирма рівнями ризику – без ризику (ймовірність стабільності понад 0.8), низький (0.6–0.8), середній (0.4–0.6) та високий ризик (менше 0.4).

Усі результати були інтегровані в єдину геоінформаційну систему, що дозволило візуалізувати й узагальнити зміни екологічного стану території. Отримані карти відобразили просторовий розподіл земного покриву, показники VARI, часткові ймовірності та фінальну карту ризику. Аналіз результатів засвідчив зменшення площ лісових і водних об’єктів, розширення відкритих ґрунтів і деградованих територій, що особливо виражено в зонах бойових дій.

Автори роблять висновок, що дистанційне зондування є незамінним інструментом моніторингу екосистем у важкодоступних або небезпечних регіонах, особливо під час воєнних дій. Запропонована технологія відзначається гнучкістю, універсальністю та можливістю адаптації до різних типів екосистем і джерел даних. Водночас відзначено обмеження, зокрема вплив сезонних умов і складність інтерпретації.

Дистанційне зондування Землі стало базовим інструментом фіксації та кількісного аналізу воєнних порушень ландшафтів у світі й в Україні, коли польові обстеження обмежені або небезпечні. Поєднання оптичних і радарних даних із ГІС забезпечує оперативність, незалежність від погоди, масштабованість і безпеку моніторингу. Багаточасові мультисенсорні спостереження дозволяють картографувати руйнування, затоплення, деградацію ґрунтів, втрати рослинності та оцінювати просторово-часові ризики [38]. Кейс Каховської ГЕС показав критичну роль супутникового моніторингу для реконструкції подій і визначення гідрологічних та соціально-економічних наслідків. Інтегровані ймовірнісні підходи на основі індикаторів (зокрема VARI, NDVI, LST, SSM та класифікацій земного покриву) формують відтворювані карти стану й зон ризику, придатні для планування відновлення. Україні доцільно запровадити обов’язковий систематичний ДЗЗ-моніторинг зон бойових дій і критичної інфраструктури, розширювати банк моделей та посилювати наземну валідацію для підвищення точності управлінських рішень.

1.3. Узагальнення світового та вітчизняного досвіду у використанні радарних даних та ДЗЗ для географічних досліджень

Сучасний розвиток географічних досліджень нерозривно пов’язаний із використанням технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та радарного спостереження, які забезпечують отримання об’єктивних даних про стан природних і антропогенних систем. Радарні місії, такі як Sentinel-1, RADARSAT, ALOS PALSAR і TerraSAR-X, відіграють ключову роль у глобальних екологічних програмах, спрямованих на моніторинг кліматичних змін, деградації земель, динаміки водних і лісових ресурсів.

У світовому науковому просторі сформувався потужний досвід інтеграції радарних даних із оптичними спостереженнями, що забезпечує багатовимірне відображення ландшафтних процесів. Такий підхід дозволяє досліджувати як структурні, так і функціональні характеристики природних систем – від морфології поверхні до динаміки вологості, біомаси чи ерозійних процесів.

Використання SAR-технологій у географічних дослідженнях відзначається високою точністю та універсальністю, оскільки вони не залежать від хмарності, часу доби чи атмосферних умов. Саме тому радарні дані стали незамінним джерелом інформації у тропічних, арктичних і воєнно небезпечних регіонах, де оптичне зондування часто обмежене.

Світова практика показує, що застосування радарного зондування особливо ефективне для картографування лісових екосистем. Зокрема, L-діапазон SAR довів свою ефективність для визначення щільності деревного покриву, обчислення запасів біомаси та виявлення деградованих ділянок. В Ірландії та Канаді подібні дослідження стали основою для розроблення національних баз лісового моніторингу, що використовуються в державній екологічній політиці.

Для гідрологічних систем радарні дані стали базовим інструментом виявлення паводків, затоплень і динаміки берегових ліній. Наприклад,

дослідження, проведені за допомогою Sentinel-1 та RADARSAT-2, продемонстрували можливість відстеження меж повеней із точністю до 10 метрів навіть у складних рельєфних умовах. Такі дані активно застосовуються у системах раннього попередження про стихійні лиха в країнах ЄС, Індії та США.

Радарне дистанційне зондування також широко використовується в сільськогосподарських дослідженнях. Завдяки можливості оцінювати вологість ґрунтів і стан посівів навіть під час суцільної хмарності, Sentinel-1 став основним інструментом для моніторингу агросистем у країнах Північної Африки, Близького Сходу та Європи. Поєднання SAR і оптичних даних дозволяє будувати моделі динаміки врожайності, прогнозувати водний дефіцит і оптимізувати використання ресурсів.

Окремим напрямом є використання інтерферометричних методів (InSAR), що дають змогу фіксувати навіть міліметрові зміни висоти земної поверхні. Ці технології застосовуються для дослідження осідань, зсувів, тектонічних рухів і навіть пошкоджень інфраструктури після землетрусів або воєнних дій.

У вітчизняній науці досвід використання ДЗЗ і радарних даних також динамічно розвивається. Українські дослідники активно впроваджують супутниковий моніторинг у галузях лісового, водного, сільськогосподарського й екологічного аналізу. Розробки наукових установ, таких як Державна служба геодезії, картографії та кадастру, Інститут географії НАН України й Центр аерокосмічних досліджень Землі, закладають підґрунтя для створення національної системи екологічного моніторингу.

Використання супутникових даних Sentinel-1 та Sentinel-2 дозволило українським вченим досліджувати стан лісових масивів Карпат, визначати вирубки та оцінювати наслідки стихійних явищ. В аграрній сфері дані ДЗЗ застосовуються для оцінки вологості ґрунтів, картування сільськогосподарських культур і прогнозування врожайності. Такі підходи

активно підтримуються платформами Google Earth Engine і Copernicus Open Access Hub.

Водні дослідження в Україні базуються на комбінації оптичних та радарних знімків, що дозволяє виявляти затоплення, зменшення рівня водосховищ і зміни русел річок. Після руйнування Каховської ГЕС методи супутникового моніторингу стали ключовими для фіксації екологічних наслідків катастрофи.

В останні роки дистанційні методи також активно використовуються для оцінки воєнних пошкоджень природного середовища. Завдяки комбінації SAR-даних і мультиспектральних знімків дослідники визначають масштаби деградації ландшафтів, зони мінної небезпеки й території з підвищеним рівнем екологічного ризику. Такі дослідження набувають особливої ваги в контексті післявоєнного відновлення територій України.

Інтеграція світового й національного досвіду демонструє, що сучасна географічна наука поступово переходить від описових до аналітичних методів інтерпретації супутникових даних. Використання машинного навчання, класифікацій на основі Wishart-розподілу, Random Forest та нейронних мереж суттєво підвищує точність інтерпретації радарних знімків.

У міжнародній практиці спостерігається тенденція до створення відкритих баз даних і платформ автоматизованої обробки. Програми NASA EarthData, ESA Copernicus та UN-SPIDER надають безкоштовний доступ до великих масивів супутникової інформації, що суттєво розширює можливості для наукових досліджень.

Українські вчені все активніше долучаються до цих програм, застосовуючи відкриті дані для створення регіональних карт ризику, оцінки деградації ґрунтів і моніторингу наслідків кліматичних змін. Вітчизняна наукова спільнота орієнтується на стандарти Європейського простору досліджень, впроваджуючи автоматизовані ГІС-системи та інструменти штучного інтелекту для аналізу супутникових даних.

Завдяки розвитку хмарних платформ обробки, таких як Google Earth Engine, стало можливим виконання комплексних аналізів на національному рівні без значних фінансових витрат на інфраструктуру. Це відкриває нові перспективи для інтеграції даних ДЗЗ у державне управління територіями, особливо в контексті екологічної безпеки.

Радарні технології також мають велике значення для оперативного моніторингу кризових ситуацій. У випадках воєнних дій, паводків або техногенних аварій саме SAR-зйомка дозволяє отримати достовірну інформацію про масштаби руйнувань і просторову динаміку подій.

Загалом, поєднання світового досвіду та українських наукових розробок демонструє поступ до формування інтегрованої системи супутникового моніторингу, що базується на принципах відкритості, сумісності даних і регулярності спостережень.

Порівняльний аналіз міжнародних і національних практик свідчить, що ефективність використання радарних даних значною мірою залежить від алгоритмів обробки, якості калібрування та доступу до наземних даних для валідації результатів.

Вітчизняна практика вже має низку досягнень у цих напрямах, однак потребує подальшої стандартизації, розширення мережі польових спостережень і підготовки спеціалістів у сфері радарної інтерпретації.

Світові тенденції вказують на зростання ролі мультисенсорних систем і контекстного аналізу даних, де враховуються просторові взаємозв’язки між пікселями та параметри текстурної структури. Це дозволяє покращити розпізнавання складних об’єктів, особливо в урбанізованих або постконфліктних зонах.

Узагальнення досвіду засвідчує, що використання радарних технологій і дистанційного зондування забезпечує якісно новий рівень географічного пізнання. Вони формують основу для кількісного аналізу природних процесів, підтримки управлінських рішень та планування сталого розвитку.

Отже, ДЗЗ і радарне зондування виступають важливими інструментальними складовими сучасної географічної науки, які поєднують глобальний і локальний рівні дослідження, сприяючи інтеграції української науки у світовий простір геоінформаційних технологій.

РОЗДІЛ 2.
ТЕРИТОРІЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика території Бахмутського району та огляд типових порушень сільськогосподарських угідь, внаслідок бойових дій

Досліджуваною територією виступає Бахмутський район Донецької області, який розташований у східній частині України та має важливе стратегічне значення. Район межує з Краматорським і Горлівським районами Донецької області та з Луганською областю, що зумовлює його розташування на перетині ключових транспортних і промислових шляхів Донбасу. Адміністративним центром є місто Бахмут – історично значущий населений пункт, який протягом століть був осередком солеваріння, промислового розвитку та культурного життя регіону [39].

Територія Бахмутського району вирізняється багатим природно-ресурсним потенціалом. У його межах зосереджені значні поклади корисних копалин, серед яких вугілля, глина, пісок, крейда та кам’яна сіль. Ці ресурси формували основу місцевої економіки, сприяючи розвитку видобувної промисловості, яка тривалий час була провідною галуззю регіону. Окрім цього, сприятливі природно-географічні умови – переважно рівнинний рельєф, помірно-континентальний клімат і родючі чорноземи – забезпечували високий аграрний потенціал території. До початку війни район активно розвивав сільське господарство, зокрема зернове виробництво, овочівництво та тваринництво [40].

Важливою перевагою Бахмутського району була розвинена транспортна інфраструктура. Через його територію проходили стратегічні автомобільні та залізничні магістралі, що забезпечували стабільне сполучення з іншими районами Донеччини та сусідніми областями. На території району функціонували залізничні станції, автотранспортні підприємства та логістичні вузли, що створювало умови для ефективного переміщення вантажів і

пасажирів. Це робило регіон привабливим для розвитку промислових підприємств та інвестиційних проєктів [40].

Поєднання природних ресурсів, вигідного географічного положення та транспортної доступності забезпечувало важливе економічне значення району в структурі Донецької області. До 2014 року він був одним із центрів промислового і сільськогосподарського виробництва, що позитивно впливало на рівень зайнятості населення та розвиток соціальної інфраструктури.

Однак із початком збройного конфлікту на сході України у 2014 році ситуація кардинально змінилася. Саме тоді Бахмутський район потрапив у зону бойових дій, і на його території почалися активні військові зіткнення, що призвели до руйнувань інфраструктури та занепаду господарської діяльності [41]. Наймасштабніші пошкодження район зазнав у період повномасштабного вторгнення у 2022 році, коли бойові дії досягли безпрецедентного рівня інтенсивності.

Внаслідок постійних обстрілів, артилерійських атак та авіаударів більшість населених пунктів району було знищено або суттєво пошкоджено. Сільськогосподарські підприємства зазнали катастрофічних втрат: зруйновано ферми, господарські споруди, складські приміщення, втрачено сільськогосподарську техніку, поголів’я худоби та великі площі орних земель. Станом на 30.11.2025 територія Бахмутського району знаходиться під повної окупацією загарбницьких військ.

Через руйнування інфраструктури та небезпеку мінування практично всі аграрні підприємства району припинили свою діяльність, і станом на 2023 рік продовжувала функціонувати лише одна ферма – «Журавушка 2006» [42]. Масштаби руйнувань у Бахмутському районі є одними з найбільших у Донецькій області: місто Бахмут повністю зруйновано, а прилеглі поля зазнали глибоких пошкоджень вибухами та пожежами.

Інтенсивне застосування важкої зброї та боєприпасів призвело до значного погіршення стану ґрунтів. У результаті вибухів утворилися воронки,

ґрунт наситився металевими уламками, залишками вибухових речовин і продуктами горіння, що викликало його хімічну деградацію. Такі процеси знижують родючість, змінюють структуру верхнього шару землі та спричиняють довготривалі наслідки для екосистеми району.

Таким чином, Бахмутський район, який раніше був важливим центром промисловості й сільського господарства, сьогодні зазнав масштабних руйнувань і втрат природно-ресурсного потенціалу.

Унаслідок воєнних дій понад 5 мільйонів гектарів українських сільськогосподарських земель залишаються непридатними до використання та зазнали різного ступеня забруднення [43]. Відповідно, науковці класифікують забруднення ґрунтів, спричинене війною, на чотири основні типи (Таблиця 1.1.).

Таблиця 1.1.

Типи забруднення ґрунтів під час бойових дій (побудовано за даними [44; 45; 46])

1	**2**	**3**
Типи забруднення	Причина	Наслідки
Механічний	Забруднення від битого скла, руху військової техніки, будівництва фортифікаційних споруд, вибухів, утворення воронок і траншей, що призводить до руйнування верхнього шару ґрунту.	Порушення структури та цілісності ґрунтового покриву, змішування родючих і неродючих шарів, підвищення ерозійної небезпеки (водної та вітрової), зменшення вологоутримуючої здатності, ускладнення рекультивації земель.
Фізичний	Рух важкої військової техніки, пожежі, вибухи, термічний вплив боєприпасів, а також забруднення радіоактивними елементами, що змінюють структуру земної поверхні.	Зміна фізичних властивостей ґрунту: ущільнення, підвищення температури та вологості, що негативно впливає на життєдіяльність рослин і тварин, зменшення аерації, зниження біологічної

1	2	3
		активності ґрунтових організмів.
Хімічний	Осідання продуктів горіння, потрапляння хімічних речовин і важких металів із вибухів, нафтопродуктів, залишків палива та токсичних компонентів у верхні шари ґрунту.	Отруєння ґрунтового середовища токсичними сполуками, підвищення концентрації важких металів, деградація ґрунтової структури, зниження врожайності, накопичення канцерогенних речовин у харчових ланцюгах.
Біологічний	Застосування токсичних і вибухонебезпечних речовин, пересування військової техніки, що ущільнює землю, а також потрапляння біологічних патогенів у результаті розкладу органічних відходів війни.	Знищення ґрунтової мікрофлори та мікрофауни, що відповідає за процеси самоочищення й гуміфікації, виникнення патогенних колоній, погіршення біологічного стану екосистеми, довготривала втрата родючості.

Унаслідок збройного протистояння на території району відбуваються всі основні типи руйнування ґрунтів. Воно охоплює комплекс процесів – від деформації земної поверхні під час руху важкої військової техніки до глибоких змін у структурі ґрунтового профілю внаслідок вибухів, бомбардувань, будівництва оборонних споруд та інженерних робіт. Такі впливи супроводжуються ущільненням верхніх шарів ґрунту та руйнуванням гумусового горизонту, що призводить до погіршення водно-повітряного режиму, зниження здатності до фільтрації й накопичення вологи, а отже, – до розвитку ерозійних процесів.

Порушення структури ґрунту відбувається внаслідок зміщення частинок і втрати агрегатної стабільності, через що знижується родючість, сповільнюються процеси гуміфікації та мінералізації, а рослини гірше

пристосовуються до зміни кліматичних умов і вологості [47]. Ущільнення землі робить її більш стійкою до подальших механічних навантажень, проте водночас обмежує доступ кисню до кореневої системи, що негативно впливає на розвиток рослинності.

Додаткову деформацію ґрунтового покриву спричиняє будівництво фортифікаційних споруд, яке супроводжується зміною мікрорельєфу місцевості, порушенням природного дренажу та зростанням ризику нехарактерних геоморфологічних процесів – зсувів, заболочення, осідань і локальних підтоплень. Ці процеси особливо інтенсивні у місцях із високим рівнем залягання ґрунтових вод або в умовах підвищеного зволоження ґрунту, що суттєво ускладнює стабілізацію земель після завершення бойових дій [48].

На території дослідження зафіксовано значні площі деградованих сільськогосподарських угідь, які мають різний характер пошкоджень. Найпоширенішими є вирви від снарядів (Рис. 2.1), вигорілі ділянки, що утворилися внаслідок вибухів і пожеж (Рис. 2.2), викопані траншеї та окопи (Рис. 2.3), а також численні сліди руху важкої техніки, що простежуються у вигляді ущільнених колій на орних землях (Рис. 2.4).

На рисунку 2.1 чітко простежується щільність розміщення воронок від артилерійських снарядів на околицях села Трипілля, що дає змогу візуально оцінити інтенсивність бойових дій на цій території та масштаб фізичного руйнування ґрунтового покриву.

Рис. 2.1. Поле вкрите вирвами від снарядів на околицях с. Трипілля Донецької області (дані: Maxar Technologies)

На рисунку 2.2 зображено територію в межах околиць села Клинове, де наслідки пожеж істотно вплинули на стан і родючість ґрунтів. Такі явища є одним із найпоширеніших екологічних наслідків бойових дій, оскільки займання від вибухів та обстрілів призводить до вигоряння рослинного покриву та втрати органічної речовини, яка є основою ґрунтової родючості.

У результаті високотемпературного впливу під час горіння відбувається зниження здатності ґрунту утримувати вологу, оскільки руйнується його агрегатна структура, зникають капілярні пори та зменшується кількість органічних сполук, що забезпечують водопроникність. Це робить поверхню більш вразливою до ерозійних процесів – як водної, так і вітрової. Після пожеж ґрунт втрачає природну стійкість, а дощові опади швидко змивають верхній гумусовий шар, сприяючи утворенню мікроярів і нерівностей рельєфу.

Крім того, знищення рослинності, яка раніше виконувала функцію закріплення ґрунту, призводить до посилення поверхневого стоку та

підвищення ризику деградації земель. На спалених ділянках порушується мікроклімат, змінюється баланс температури й вологості, що ускладнює природне відновлення рослинного покриву.

Важливим фактором є й підвищення температури ґрунту під час горіння, яке згубно впливає на ґрунтові мікроорганізми – бактерії, гриби та інші мікробіоценози, що забезпечують ключові біохімічні процеси, зокрема розклад органічних решток, гуміфікацію та азотфіксацію [46]. Їх загибель призводить до зменшення вмісту поживних речовин і сповільнення біологічного кругообігу.

Таким чином, як показано на рисунку 2.2, пожежі на околицях с. Клинове не лише спричинили втрату родючості та руйнування структури ґрунтів, а й активізували деградаційні процеси, наслідки яких можуть зберігатися протягом тривалого часу після припинення вогню.

Рис. 2.2. Ділянки поля на околицях с. Клинове Донецької області постраждалі від пожежі (дані: Maxar Technologies)

Однією з характерних особливостей ведення бойових дій є масове будівництво окопів та фортифікаційних споруд, що виступають ефективним засобом маскування та захисту військових підрозділів (Рис. 2.3) [49]. Проте, попри їхню стратегічну важливість, такі інженерні конструкції справляють значний негативний вплив на природне середовище, особливо на стан ґрунтового покриву та агроландшафтів.

Під час риття окопів і траншей відбувається зняття верхнього гумусового шару, який є найбільш родючою частиною ґрунту. Це спричиняє руйнування його структури, втрату поживних речовин і мікроелементів, необхідних для росту рослин. Знижується вміст органічної речовини, порушується баланс вологи та зменшується біологічна активність ґрунтових мікроорганізмів. У результаті таких процесів деградує не лише окрема ділянка, а й навколишні землі, які потрапляють у зону техногенного впливу.

Наслідки спорудження оборонних елементів проявляються як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі. У короткостроковому періоді спостерігається миттєве порушення рельєфу, знищення рослинного покриву та зменшення здатності ґрунту утримувати вологу. У довготривалому ж вимірі ці зміни можуть призвести до втрати родючості, посилення ерозійних процесів і зниження здатності території до природного відновлення.

Розміщення великої кількості траншей, бліндажів і сховищ змінює природну морфологію місцевості, створює нові форми мікрорельєфу, які є схильними до змиву дощовими водами та вітрової ерозії. Крім того, у процесі будівництва та використання таких споруд ґрунти забруднюються залишками боєприпасів, паливно-мастильних матеріалів, вибухових речовин і важких металів, що накопичуються у верхньому шарі землі та мають токсичну дію на рослинність і ґрунтові організми.

Таким чином, хоча окопи та фортифікаційні споруди (Рис. 2.3) відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки військових, їх будівництво призводить до

глибоких екологічних змін, які вимагають подальшого наукового моніторингу та рекультиваційних заходів для відновлення природного стану земель.

Рис. 2.3. Викопані окопи (дані: Maxar Technologies)

Рисунок 2.4 ілюструє наслідки переміщення важкої військової техніки, що справляє значний механічний тиск на поверхню ґрунту. Такі впливи призводять до ущільнення ґрунтового покриву в місцях постійного руху техніки, внаслідок чого зменшується пористість і водопроникність землі, порушується її природна структура та газообмін.

У місцях багаторазового проходження транспортних засобів формуються глибокі колії, які з часом перетворюються на стійкі деформації мікрорельєфу. Це створює умови для накопичення поверхневих вод, особливо під час опадів, що сприяє локальному заболочуванню або, навпаки, вимиванню верхнього родючого шару ґрунту.

У сезон дощів такі колії швидко розширюються, поступово перетворюючись на малі ерозійні форми, а згодом – на яри, які ускладнюють подальше використання земель для сільськогосподарських потреб. Ущільнений ґрунт втрачає здатність утримувати вологу та повільніше відновлюється після механічних навантажень, що негативно позначається на розвитку рослинності та продуктивності агроекосистем.

Таким чином, як видно на рисунку 2.4, рух важкої техніки є одним із найпоширеніших факторів механічної деградації ґрунтів, який призводить до довготривалих змін у структурі поверхні, посилення ерозійних процесів і порушення природного гідрологічного режиму території.

Рис. 2.4. Сліди від важкої техніки (дані: Maxar Technologies)

Отже, Бахмутський район Донецької області – територія з розвиненою інфраструктурою та значним природно-ресурсним потенціалом, проте внаслідок воєнних дій, що тривають з 2014 року та посилилися у 2022-му, зазнав

масштабних руйнувань. Станом на 2025 рік район перебуває під окупацією, що унеможливлює відновлення господарства. Значні площі сільськогосподарських угідь залишаються забрудненими та деградованими через вибухи снарядів (Рис. 2.1), пожежі (Рис. 2.2), будівництво оборонних споруд (Рис. 2.3) і рух важкої техніки (Рис. 2.4). Унаслідок цього більшість підприємств припинили роботу, а колись родючі землі перетворилися на зони екологічної небезпеки, що потребуватимуть тривалого відновлення після завершення бойових дій.

2.2. Характеристика радарних даних та SAR-технології. Sentinel-1

Радар з синтезованою апертурою (SAR) формує зображення на основі активного мікрохвильового зондування поверхні, що дозволяє отримувати дані незалежно від освітлення, пори доби та погодних умов, на відміну від оптичних супутників, які для запису сигналу використовують відбите світлове випромінення. Завдяки цьому SAR-системи забезпечують безперервний моніторинг навіть у складних кліматичних або кризових ситуаціях, коли оптична зйомка унеможливлена через хмарність чи задимленість атмосфери.

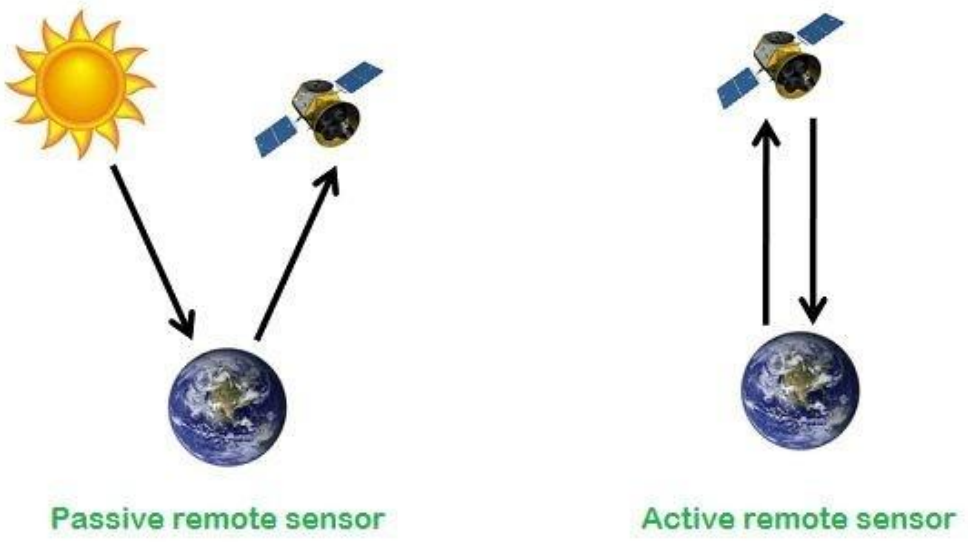

Рис. 2.5. Різниця принципу отримання оптичних та радарних даних [50]

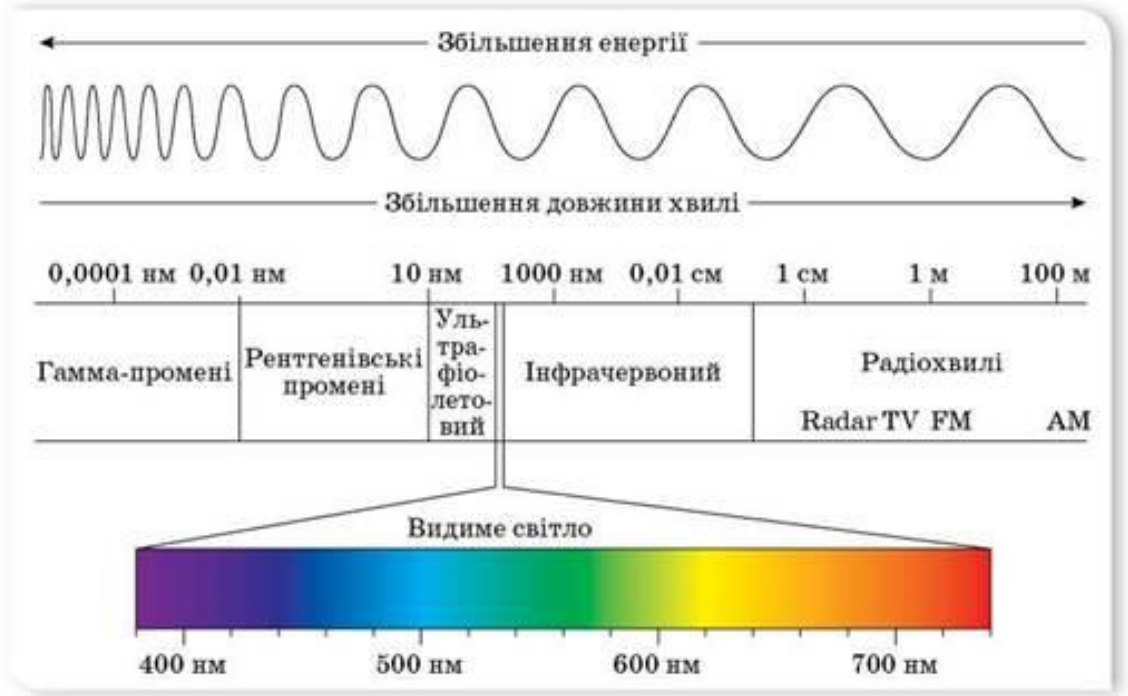

Рис. 2.6. Різниця довжини хвиль оптичних та радарних даних [51]

Принцип роботи SAR полягає у випромінюванні супутником коротких високочастотних радіоімпульсів і реєстрації потужності відбитого сигналу від земної поверхні. Кожен сигнал несе інформацію про властивості об’єкта, з якого він відбився. На відміну від традиційних радарів, що використовують фізично велику антену, SAR застосовує явище синтезованої апертури: рух супутника або літака уздовж орбіти “імітує” довгу антену. Це досягається шляхом когерентного накопичення численних відбитих сигналів та їх подальшої цифрової обробки з використанням доплерівського ефекту. У результаті створюється висока просторово-радіометрична роздільність навіть для невеликих розмірів антени [52].

Отримані знімки SAR відображають інформацію у двох координатах:

- дальність (range) – визначається часом проходження сигналу до об’єкта і назад,
- азимут (azimuth) – формується на основі різниці доплерівських частот, що виникають у процесі руху апарата.

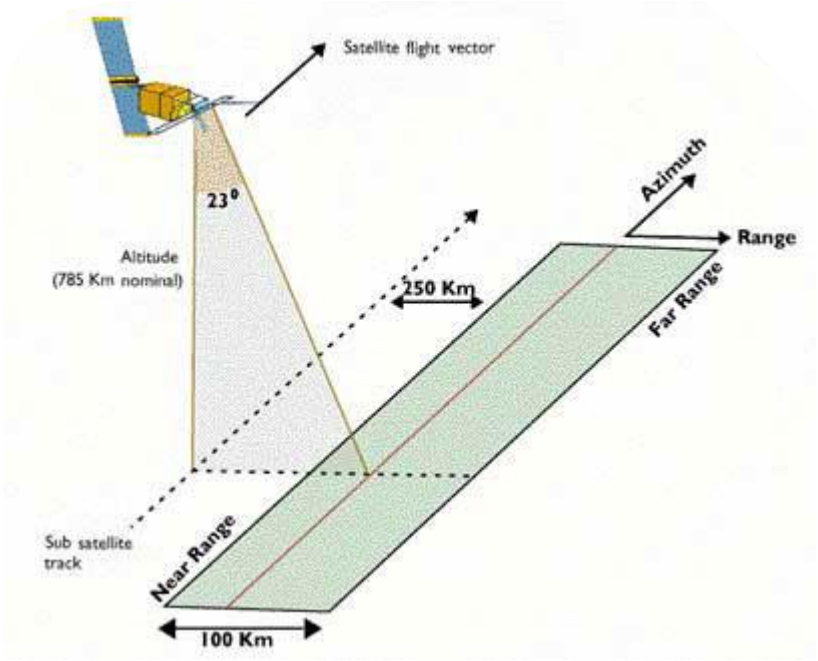

Рис. 2.7. Принцип роботи SAR (Synthetic Aperture Radar) [53]

Інтенсивність зворотного розсіяння (backscatter), зафіксована на зображенні, безпосередньо відображає фізичні властивості поверхні: шорсткість, вологість, щільність рослинного покриву, кут нахилу схилів та геометрію об’єктів.

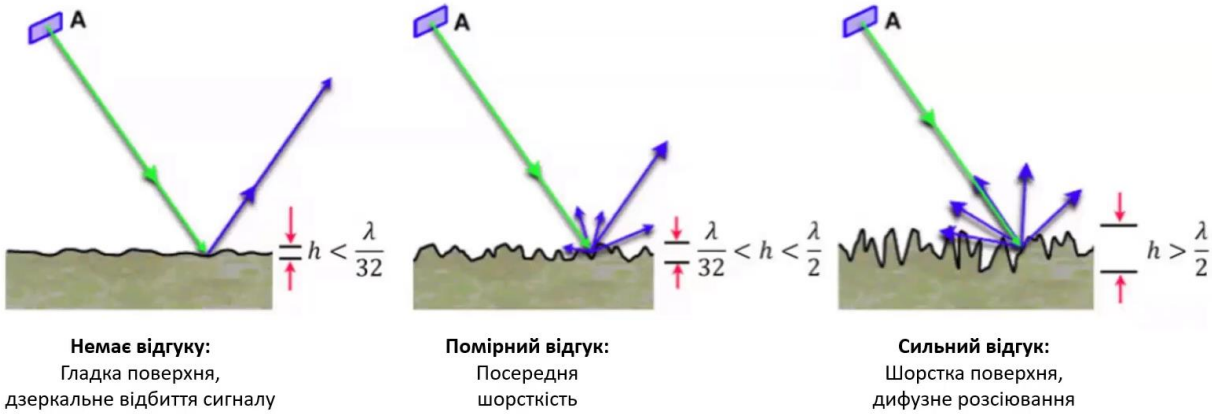

Рис. 2.8. Сила відгуку радарних даних [54]

Наприклад, водна поверхня або асфальт відбивають сигнал слабко (темні ділянки на знімку), тоді як лісові масиви чи міські території мають високе зворотне розсіяння (світлі тони).

Завдяки таким характеристикам SAR-зйомка дає змогу проводити моніторинг стану сільськогосподарських угідь, визначати ступінь деградації ґрунтів, виявляти підтоплення, оцінювати площі пожеж чи пошкоджень навіть за умов повної відсутності оптичних даних. Крім того, багаточасові серії SAR-зображень дозволяють досліджувати динаміку змін у ландшафті.

SAR-системи забезпечують просторову роздільність від кількох до десятків метрів, що дозволяє аналізувати структуру полів, сліди техніки та дрібні порушення ґрунту. Висока деталізація важлива для картографування меж угідь, фіксації мікроморфологічних змін та виявлення ознак деградації [55]. Однією з головних переваг SAR є мультитемпоральність: регулярна повторюваність зйомок (наприклад, Sentinel-1 – кожні шість діб) дає змогу відстежувати динаміку стану земель у будь-яку пору року та отримувати стабільні серії спостережень незалежно від хмарності чи погодних умов, що значно розширює можливості порівняльного аналізу.

Важливе значення мають поляризаційні режими, які визначають орієнтацію електричного поля хвилі та впливають на характер зворотного розсіяння. Для Sentinel-1 найбільш поширені комбінації VV та VH.

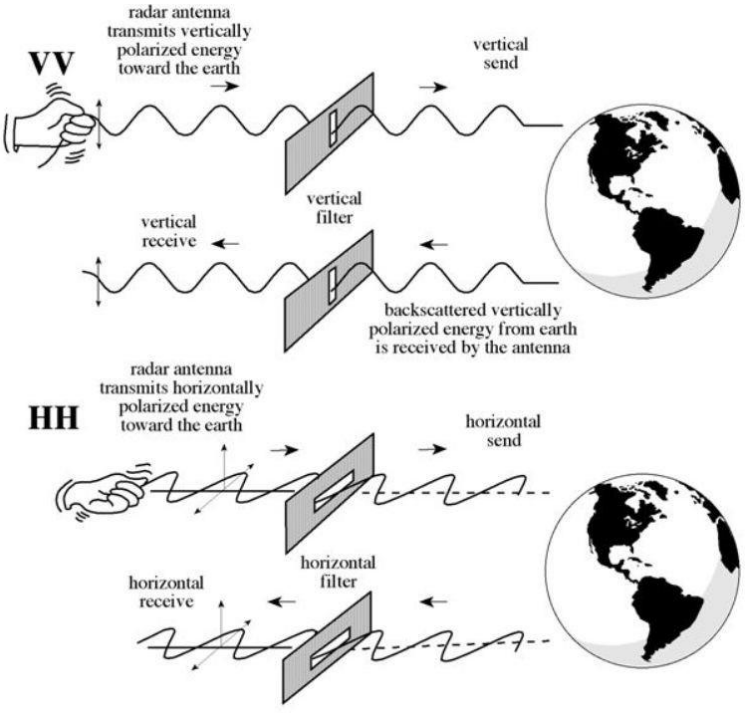

Рис. 2.10. Типи поляризація [54]

Поляризація VV чутлива до вертикально організованих структур і до змін вологості ґрунту, що дозволяє оцінювати стан поверхневого шару та визначати ступінь його перезволоження або висихання. Поляризація VH забезпечує інформативність щодо неоднорідності та об’ємності рослинного покриву, відображаючи густоту, структуру та стан посівів. Комбіноване використання VV і VH підвищує точність класифікації типів земель, дозволяє відрізняти оброблювані поля від занедбаних, визначати ступінь ушкоджень рослинності та виявляти ділянки зі змінами у біофізичних властивостях. У багатополяризаційних системах (наприклад, HV, HH чи повнополяриметричних режимах) можливості аналізу ще ширші: з’являється можливість оцінювати внутрішню структуру рослинного покриву, рівень його неоднорідності, ступінь розвитку біомаси та елементи мікрорельєфу, що своєю чергою підсилює потенціал тематичної класифікації [56].

Не менш важливим параметром є довжина хвилі, адже різні діапазони мікрохвиль взаємодіють із поверхнею по-різному.

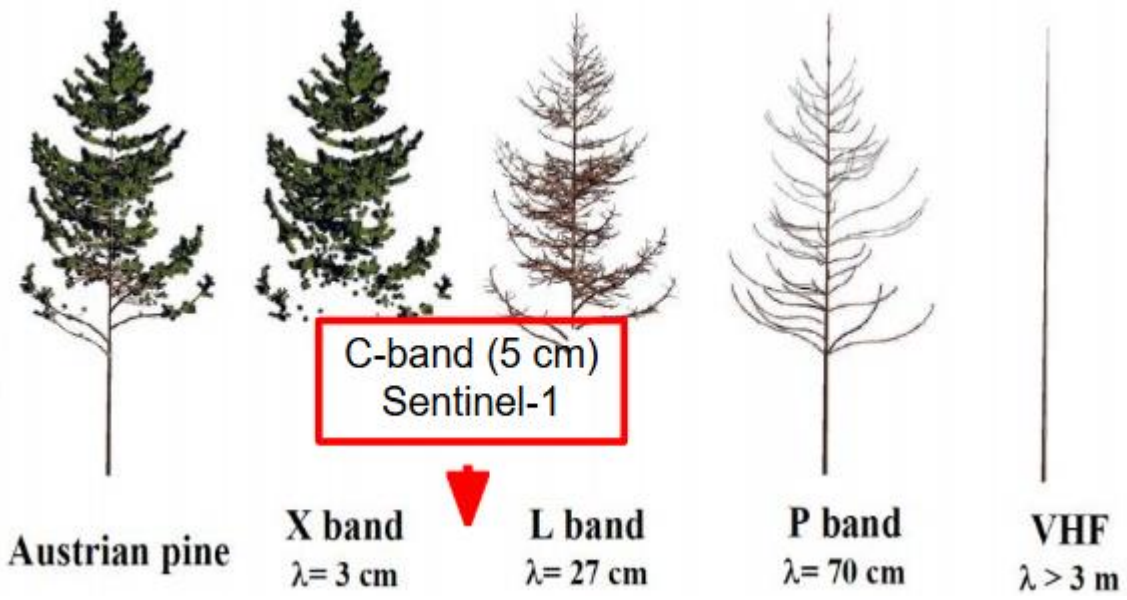

Рис. 2.11. Залежність ігнорування об’єктів від довжини хвилі [57]

С-діапазон Sentinel-1 (≈5,6 см) оптимальний для вивчення сільськогосподарських угідь, оскільки добре реагує на зміни вологості, структуру поверхні та стан рослинності. Довша L-хвиля (ALOS-PALSAR)

краще проникає крізь рослинний покрив, що важливо для дослідження лісів та оцінки біомаси, тоді як коротший X-діапазон (TerraSAR-X) забезпечує найвищу деталізацію дрібних об’єктів. Сукупність цих параметрів робить SAR одним із найефективніших інструментів для комплексного аналізу стану аграрних територій і моніторингу динамічних процесів у ландшафті [57].

Ефект геометрії огляду в SAR-зйомці зумовлений тим, що радар реєструє поверхню не вертикально зверху, як оптичні сенсори, а під певним косим кутом. Це призводить до появи геометричних спотворень, які є особливістю радіолокаційних зображень і можуть як ускладнювати інтерпретацію, так і слугувати додатковим джерелом інформації про рельєф та антропогенні об’єкти. Найхарактернішими є ефекти радарних тіней, скорочення схилу (foreshortening), яскравих зон подвійного відбиття (double-bounce) та інверсійного перекриття (layover), які особливо помітні на нерівних або порушених поверхнях.

Тіньові зони (radar shadow) виникають там, де об’єкт або рельєф перекриває сигнал і радар не може «побачити» ділянку, що знаходиться за ним. У результаті формуються темні, повністю безтекстурні області. У природних рівнинних агроландшафтах тіні зазвичай незначні, але навіть невеликі перепади висоти, спричинені насипами, окопами, брустверами чи воронками, створюють чіткі тіні, які добре видно на SAR-зображеннях. Тінь дозволяє оцінити орієнтацію об’єкта, його форму та відносну висоту, а також виокремлювати елементи рельєфу, непомітні на оптичних знімках через рослинність чи маскування [58].

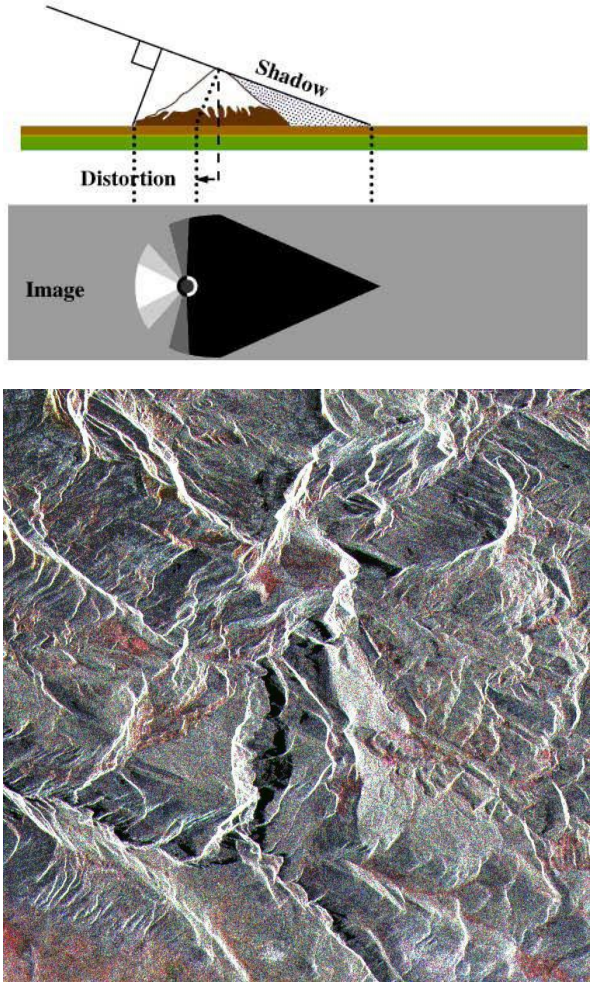

Рис. 2.12. Тіньові зони радарних даних [53]

Подовження (foreshortening) виникає тоді, коли радар «дивиться» на підвищення під гострим кутом: верхня частина об’єкта фіксується раніше, ніж нижня, через що об’єкт виглядає стисненим або нахиленим у бік радара. У випадку схилів, земляних валів, висипів, укріплень або контурів вирв цей ефект дозволяє виявити навіть незначні вертикальні зміни. Подовження може підсилювати контраст між порушеною та непорушеною частинами поля, роблячи антропогенні елементи рельєфу більш помітними [59].

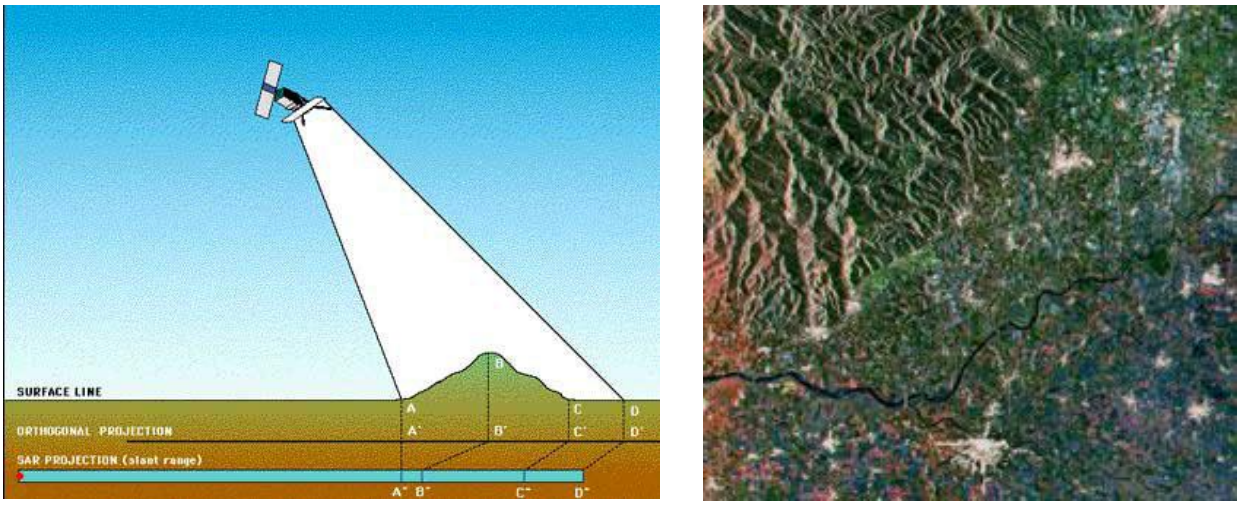

Рис. 2.13. Ефект подовження. Приклад спотворень поверхні на радіолокаційних даних [53]

Подвійне відбиття (double-bounce) виникає у місцях, де є комбінація вертикальної та горизонтальної поверхні, наприклад: стінка окопу + дно траншеї, техніка + земля, насип + рівна прилегла ділянка. Радіохвиля спочатку відбивається від вертикальної поверхні, потім від горизонтальної і лише після цього повертається до радара, що створює дуже яскраві пікселі. На сільськогосподарських територіях природні об’єкти рідко формують double-bounce, тому його поява є сильною ознакою техногенних або оборонних споруд. Такий ефект допомагає виявляти замасковані об’єкти, ідентифікувати траншеї, визначати їхню структуру й орієнтацію та оцінювати зміни, пов’язані з переміщенням техніки або будівництвом укріплень [60].

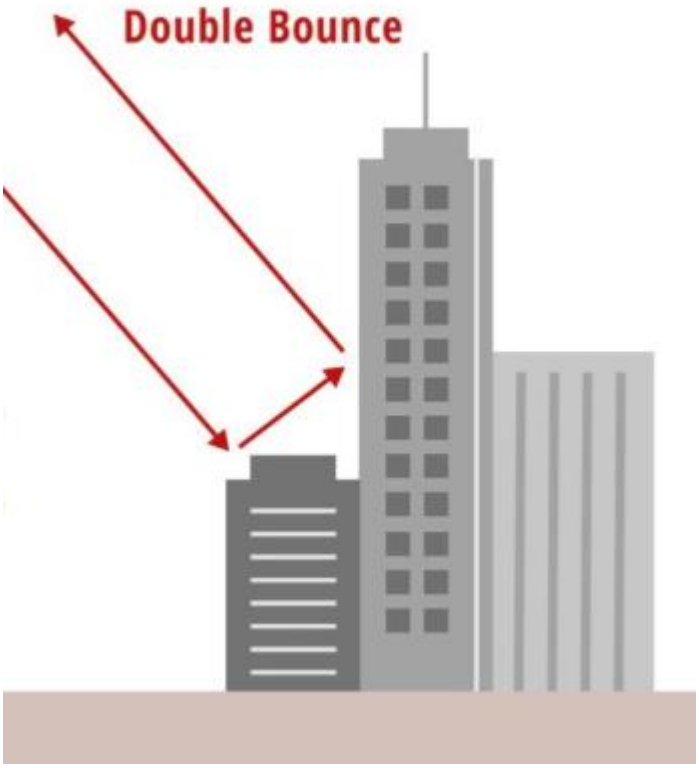

Рис. 2.14. Подвійне відбиття радарних даних [60]

Таким чином, геометричні ефекти, спричинені косим оглядом SAR, хоч і можуть сприйматися як спотворення, насправді є ключовими діагностичними індикаторами зміненого рельєфу. На рівнинних ділянках вони проявляються мінімально, однак у місцях із порушеною поверхнею – вирвами від вибухів, окопами, насипами, бліндажами, траншеями та іншими оборонними елементами – ці ефекти дозволяють точно окреслити геометрію об'єктів, визначити їхній стан і просторову структуру. Завдяки цьому SAR-дані є незамінними для аналізу антропогенних змін рельєфу та моніторингу територій, що зазнали воєнного впливу [61].

Матеріалом для проведення дослідження було обрано продукт місії Sentinel-1 (супутники Sentinel-1A та 1B), яка є частиною європейської програми Copernicus, призначена для високочастотного радіолокаційного моніторингу Землі в мікрохвильовому C-діапазоні. Апарати працюють на сонячно-

синхронній орбіті висотою приблизно 693 км з локальним часом проходження вузла о 06:00 (висхідна гілка). Завдяки конфігурації орбіт і повторюваності треків забезпечується період повторного огляду для території України приблизно 6 діб у разі роботи двох супутників. Основним режимом зйомки для моніторингу суходільних територій є Interferometric Wide Swath (IW), що охоплює смугу 250 км із просторовою роздільністю приблизно 5×20 м за рахунок використання технології Terrain Observation with Progressive Scans (TOPS). Додатково застосовуються режими Extra Wide Swath (EW) та Stripmap (SM), які різняться деталізацією і шириною покриття залежно від дослідницьких потреб [62].

Дані Sentinel-1 доступні у форматах GRD і SLC, що суттєво відрізняються за структурою та науково-практичним застосуванням. Продукти GRD (Ground Range Detected) містять інтенсивність зворотного розсіяння, спроєктовану в геометрію дальності (ground range) та піддану попередній радіометричній і геометричній обробці. Вони є оптимальними для тематичного картографування земельного покриву, оцінювання вологості ґрунту, виявлення деградованих ділянок, розмежування полів та аналізу структурних характеристик агроландшафтів. Натомість SLC (Single Look Complex) зберігає повну комплексну інформацію – амплітуду та фазу – що дає змогу здійснювати інтерферометрію (InSAR), аналіз когерентності поверхні, визначати деформації та осідання з точністю до міліметрів, а також виконувати повнополяриметричні перетворення у межах доступних каналів [63].

Sentinel-1 функціонує у C-діапазоні (~5,4–5,6 см), який є компромісним між здатністю проникнення мікрохвиль у рослинний покрив та чутливістю до поверхневих властивостей ґрунту. На відміну від коротших хвиль X-діапазону, C-діапазон менш чутливий до дрібних деталей мікрорельєфу, але краще відображає структурні й діелектричні властивості ґрунту, включаючи зміну вологості, ступінь ущільнення, нерівності поверхні, наявність техногенних порушень. Він водночас не настільки глибоко проникає в рослинність, як L-

діапазон, що робить його оптимальним саме для аналізу аграрних територій, де важливо отримувати стабільні сигнали як від верхнього шару ґрунту, так і від надземної біомаси.

Поляризаційні можливості Sentinel-1 представлені переважно режимами VV і VH, що забезпечують двоканальне розсіяння. Поляризація VV формує сигнал, чутливий до вертикально орієнтованих структур і змін діелектричних властивостей, зокрема вологості ґрунту після опадів або іригації. Вона також добре відображає структуровані поверхні, такі як оброблені поля з регулярними борознами. Поляризація VH, що належить до перехресного типу, забезпечує високу чутливість до неоднорідності та об'ємної структури рослинності. Вона реагує на густоту посівів, фазу вегетації, рівень розвитку стебел і листя, що робить цей канал важливим для виявлення занедбаних або недоглянутих ділянок, аналізу пошкоджень рослинного покриву та оцінки біомаси. Використання обох поляризацій у комплексі дозволяє застосовувати двоканальну класифікацію, підвищує радіометричну стабільність інтерпретації й дає змогу краще розрізняти види покривів та стани агроландшафтів [64].

У сукупності параметри місії Sentinel-1 – орбітальна регулярність, стабільність мікрохвильового випромінювання C-діапазону, доступність GRD та SLC продуктів і двоканальна поляризація – роблять ці дані високотехнологічною основою для комплексного географічного аналізу сільськогосподарських територій.

2.3. Можливості і особливості амплітудних даних SAR для географічного аналізу стану сільськогосподарських угідь

Амплітудні значення на радарних знімках SAR є результатом вимірювання потужності електромагнітної хвилі, що була відбита від земної поверхні назад до приймача. Основним параметром, який описує це явище, є коефіцієнт зворотного розсіяння σ^0 (sigma nought) – нормалізована величина, що

показує, скільки енергії повертається до радара з одиниці площі поверхні, скоригованої на геометрію огляду. Значення σ^0 інтерпретують у логарифмічній шкалі в децибелах (дБ), що дозволяє зручно оцінювати дуже широкий діапазон інтенсивностей.

Зворотне розсіяння (backscatter) формується внаслідок електромагнітної взаємодії хвилі з мікро- та макроструктурою поверхні – шорсткістю, вологістю, орієнтацією елементів, наявністю кутових відбивачів (наприклад, техніки або будівель), рослинним покривом чи оголеним ґрунтом. Чим більше хвиля «зачіпляється» за структурні нерівності або елементи сцени, тим вищим є зворотнє розсіяння.

Інтенсивність (amplitude, intensity) – це фактичне зчитане значення потужності сигналу, яке після радіометричної корекції перетворюють у σ^0. Інтенсивність відображає сумарний ефект усіх механізмів розсіяння: поверхневого (surface scattering), об’ємного (volume scattering) та подвійного відбиття (double-bounce) [65].

Для різних типів поверхні характерні різні рівні σ^0. Наприклад, гладкі поверхні (вода, утрамбований ґрунт) спричиняють майже дзеркальне відбиття і повертають мало енергії, формуючи низькі значення σ^0. Навпаки, шорсткі та структурно складні поверхні (ліс, урбанізовані території, свіжо оброблені поля) розсіюють сигнал у різних напрямках і значно більшу частину енергії повертають до радара, що проявляється високими амплітудними значеннями.

Амплітудні зображення SAR є надзвичайно інформативними, оскільки дозволяють виявляти фактичний фізичний стан поверхні: ступінь зволоження ґрунту, наявність рослинності, ерозійні зміни, залишки техніки, вирви, спалені ділянки, зміни в обробітку земель та інші типи просторових деформацій. Завдяки високій чутливості σ^0 до діелектричних властивостей, амплітудні значення стають ключовим показником для моніторингу сезонних процесів та діагностики деградованих територій.

У свою чергу Вологість ґрунту є одним із ключових факторів, що визначають інтенсивність зворотного розсіяння радарного сигналу. Коли вміст води у ґрунті збільшується, змінюються його діелектричні властивості, насамперед – діелектрична проникність (ε). Вода має значно вищу діелектричну проникність (≈80) порівняно з сухим мінеральним ґрунтом (≈3–7), тому навіть невелике підвищення вологості істотно збільшує контраст у відбитті електромагнітної хвилі.

Через зростання ε поверхня стає більш здатною поглинати та перерозподіляти електромагнітну енергію, що призводить до посилення зворотного розсіяння (backscatter). У результаті радар приймає потужніший сигнал, а значення σ^0 на зображенні збільшуються. На амплітудному знімку це проявляється у вигляді яскравіших пікселів, які чітко вирізняють вологі ділянки від сухих.

Підвищення вологості ґрунту також впливає на механізм поверхневого розсіяння. Волога поверхня стає більш провідною й отримує властивості, близькі до напівдзеркальної структури, що сприяє зростанню інтенсивності відбиття при певних кутах огляду. При цьому навіть дрібні нерівності або мікрошорсткість поверхні можуть викликати локальне збільшення зворотного розсіяння, посилюючи контраст між ділянками з різним рівнем вологості [66].

Завдяки цим фізичним особливостям амплітудні дані SAR надзвичайно ефективні для визначення перезволожених чи заболочених ділянок, які проявляються підвищеною яскравістю. Це особливо важливо для сільськогосподарських територій, де зміни вологості безпосередньо впливають на продуктивність ґрунту, строки робіт та загальний стан агроландшафтів.

Крім того, SAR дає можливість моніторити водонасичення навіть у складних умовах – за хмарності, вночі, та у міжсезоння, коли оптичні дані недостатньо інформативні. Тому зміни амплітудних значень у радарних даних дозволяють оперативно відстежувати гідрологічний стан території, оцінювати

дренованість земель, прогнозувати ризики підтоплень або водної ерозії та своєчасно виявляти порушення в режимі зрошення.

Поведінка амплітудних значень SAR дозволяє не лише оцінювати фізичні властивості ґрунту, але й визначати стан та тип землекористування, оскільки структура поверхні безпосередньо впливає на характер зворотного розсіяння. Оброблені сільськогосподарські поля зазвичай мають регулярну, вирівняну поверхню з однорідною мікрошорсткістю, що забезпечує стабільний та рівномірний рівень backscatter. На таких ділянках амплітудні значення демонструють плавні, слабо варіативні переходи, що свідчить про контрольований агротехнічний стан ґрунту [67].

Навпаки, занедбані або довго необроблювані поля характеризуються підвищеною неоднорідністю структури. З часом на цих ділянках формуються: хаотичні нерівності, мікрорельєфні елементи, мозаїчна рослинність, окремі кущі, високотрав'я або навіть вторинні сукцесії. Усе це значно ускладнює взаємодію електромагнітної хвилі з поверхнею. У результаті зворотне розсіяння стає просторово нерівномірним, а σ^0 на таких територіях проявляється у вигляді строкатого, неоднорідного амплітудного малюнка з численними локальними контрастами.

Додатково на занедбаних територіях часто спостерігаються більші коливання вологості – через слабку дренованість, відсутність механічного обробітку, застій води у незначних пониженнях. Це ще більше посилює контрастність backscatter і спричиняє появу яскравих та темних плям різної інтенсивності, що добре виділяється на SAR-зображеннях. Таким чином, амплітудні дані дозволяють чітко розрізняти оброблювані та занедбані землі, що є особливо важливим для аналізу стану агроландшафтів у регіонах, де сільське господарство було порушене воєнними діями, тривалою окупацією чи відсутністю господарської діяльності.

Подібні механізми просторової неоднорідності амплітудного сигналу характерні й для інших типів порушень поверхні, зокрема для наслідків пожеж,

вибухів та руху важкої техніки. Пожежі кардинально змінюють взаємодію мікрохвильового сигналу з поверхнею, оскільки знищення рослинності призводить до зникнення об’ємного розсіяння, притаманного густим рослинним покривам. Після вигоряння поверхня стає більш гладкою, менш структурованою та часто вкривається шаром дрібного попелу або обвуглених решток, які мають інші діелектричні властивості. У результаті рівень σ^0 різко знижується або вирівнюється, і вигорілі ділянки проявляються як затемнені, однорідні області на амплітудних знімках SAR. Втрата біомаси також призводить до зменшення здатності поверхні утримувати вологу, що додатково впливає на зменшення інтенсивності відбиття у наступні дні чи тижні після пожежі.

Інший характерний тип порушень – вирви від вибухів. Вони формують локальні заглиблення з різко зміненою геометрією поверхні, що впливає на кут падіння та повернення сигналу. Краї вирв створюють комбінацію ділянок підвищеного та зниженого backscatter: вертикальні або похилі стінки можуть формувати сильне відбиття через кутові ефекти, тоді як дно вирви часто виглядає темнішим через тіньові зони або поглинання. Тому на знімках SAR вирви вирізняються як контрастні, чітко окреслені структури, що формують характерні кільцеподібні або плямисті патерни.

Порушення, спричинені рухом військової або важкої техніки, створюють довгі лінійні сліди з іншою шорсткістю, ущільненим ґрунтом або зміщеною рослинністю. Ущільнення поверхні змінює діелектричні властивості й знижує мікрошорсткість, що може проявлятися як зниження амплітуди. Натомість зруйнована рослинність або перемішані ґрунтові шари формують області з підвищеним розсіянням. У підсумку такі сліди зазвичай виглядають як різкі лінійні контрасти на фоні навколишнього ландшафту.

Таким чином, амплітудні значення SAR дозволяють не лише диференціювати тип землекористування, а й достовірно фіксувати ознаки деградації, механічних порушень та наслідки бойових дій, оскільки кожен тип

порушення створює унікальний «амплітудний підпис». Це робить амплітудні дані одним із ключових інструментів для аналізу стану сільськогосподарських угідь у районах, де ландшафт зазнав інтенсивних антропогенних або військових впливів.

Однак, попри високу інформативність амплітудних даних, їх використання має низку специфічних обмежень, зумовлених фізичною природою радарного сигналу. Одним із ключових факторів є когерентність SAR, тобто використання узгоджених у фазі хвиль при формуванні зображення. Саме ця властивість забезпечує високу роздільність незалежно від висоти орбіти, але водночас призводить до появи характерного явища – спекл-шуму (speckle noise). Спекл є мультиплікативним шумом, що виникає внаслідок інтерференції хвиль, відбитих від численних дрібних розсіювачів у межах одного пікселя. У результаті амплітудне зображення набуває «зернистої» структури, де яскравість пікселів варіює навіть на однорідних ділянках, створюючи уявний візуальний хаос. Наявність спеклу ускладнює розпізнавання дрібних або слабоконтрастних об’єктів, знижує точність виділення меж полів, вирв чи техногенних слідів, а також ускладнює аналіз мікроструктурних змін, особливо в регіонах із неоднорідною рослинністю. Для мінімізації цього ефекту застосовують різні методи фільтрації – середньоквадратичні, адаптивні (Lee, Frost, Kuan), багаточасові композитні підходи або методи локальної статистичної регуляризації. Проте навіть після фільтрації необхідно зважати, що надмірне згладжування може «розмити» реальні межі об’єктів, тому оптимальний баланс між шумопригніченням і збереженням деталей має велике значення.

Ще одним важливим аспектом є залежність амплітудних значень від кута огляду (incidence angle). SAR працює в режимі бічного огляду, тому величина σ^0 змінюється в залежності від того, під яким кутом хвиля падає на поверхню. На передньому схилі (менший incidence angle) поверхня виглядає яскравішою через сильніше відбиття, тоді як на дальніх ділянках (більший кут) backscatter

зменшується. Це створює градієнти інтенсивності навіть на однорідних територіях, що може бути помилково інтерпретовано як зміна властивостей ґрунту або рослинності. Тому для коректного аналізу часто застосовують нормалізацію σ^0 до стандартного кута або використовують моделі BRDF-типу (bidirectional reflectance) для радарних даних [53].

Крім геометричних ефектів, на амплітуду суттєво впливають сезонні коливання вологості, зміни структури рослинного покриву та агротехнічні цикли. Після опадів рівень σ^0 різко зростає через підвищену діелектричну проникність, тоді як під час посухи він, навпаки, зменшується. Взимку на поверхню впливає сніговий покрив, який може або приглушувати сигнал, або формувати додаткові шари розсіяння залежно від щільності та стану снігу. Через ці чинники два знімки одного поля, зроблені в різні пори року або навіть після різної кількості опадів, можуть мати дуже відмінні амплітудні характеристики, що ускладнює їх пряме порівняння.

Для забезпечення коректності різночасового аналізу амплітудні дані потребують нормалізації у часі та просторі – тобто приведення всіх спостережень до спільного радіометричного та геометричного стандарту. З цією метою використовують періодичні композити, статистичну стандартизацію, корекцію від кута огляду, а також моделі зміни вологості, які дозволяють відрізняти реальні структурні зміни від сезонних флуктуацій.

Таким чином, незважаючи на високу цінність амплітудної інформації при виявленні деградованих поверхонь, пожеж, вирв чи занедбаних полів, її використання вимагає високої методологічної акуратності. Поєднання фільтрації спеклу, геометричної нормалізації та урахування сезонних процесів є критично важливим для отримання надійних результатів при моніторингу сільськогосподарських угідь і територій, порушених воєнними діями.

2.4 Методика обробки та аналізу радарних даних для оцінки пошкоджень сільськогосподарських угідь

Для дослідження у якості матеріалу для обробки та географічного аналізу були взяти знімки з супутника Sentinel-1. Даний супутник було обрано через його доступність та ефективність. Знімки було завантажено в рівні обробки GRD (Ground Range Detected). Дані Sentinel-1 GRD (Ground Range Detected) є попередньо обробленим продуктом радарної зйомки, в якому сирі SAR-ехосигнали перетворені у зображення, вже проєктоване в наземну систему координат. У процесі формування GRD виконується фокусування сигналу, багатократне усереднення (multilooking) для зменшення спеклу та радіометричне нормування до коефіцієнта розсіяння σ^0. Зображення має піксельний крок 10 м і є оптимальним для картографічного аналізу, моніторингу ландшафтів та оцінювання змін поверхні. Продукти можуть містити поляризації VV і VH, що дає змогу аналізувати як оголені або оброблені ґрунти, так і структуру рослинності та техногенні порушення. GRD широко застосовується для виявлення пожеж, вирв, затоплень, деградованих ділянок і для побудови амплітудних індексів. Для точного географічного співставлення GRD зазвичай додатково проходить орбіткорекцію, калібрування, фільтрацію спеклу та Terrain Correction у спеціалізованому ПЗ, наприклад SNAP [68].

Для обробки знімків було обрано програму SNAP, оскільки це спеціалізоване програмне забезпечення, розроблене Європейським космічним агентством для високоточної обробки супутникових даних місій Copernicus, зокрема Sentinel-1. Платформа має модульну архітектуру, у якій ключову роль відіграє S1 Toolbox – набір алгоритмів, оптимізованих саме для роботи з радарними зображеннями у форматах GRD та SLC. SNAP забезпечує виконання повного циклу радіометричної обробки, включаючи калібрування, нормалізацію коефіцієнтів зворотного розсіяння та перетворення цифрових чисел у фізично обґрунтовані величини σ^0 чи γ^0. Програма також реалізує

широкий спектр методів фільтрації спеклу, серед яких Refined Lee, Gamma-MAP та багаточасові підходи, що дає змогу істотно зменшити шум без втрати просторових деталей. Геометрична корекція виконується за допомогою алгоритму Range-Doppler Terrain Correction із використанням цифрових моделей рельєфу, що гарантує точне геоприв'язування та коректність подальшого аналізу. SNAP підтримує ко-реєстрацію багаточасових сцен із субпіксельною точністю, що є критично важливим для досліджень типу change detection та оцінювання деградаційних процесів на сільськогосподарських угіддях. Крім того, інструментальний набір програми містить розширені функції візуалізації, побудови гістограм, профільного аналізу та створення нових спектральних або амплітудних каналів через математичний редактор Band Maths. Завдяки Graph Builder користувач може автоматизувати весь ланцюг обробки, забезпечивши відтворюваність і стандартизованість результатів. Висока точність реалізованих алгоритмів, повна відповідність специфікаціям ESA та можливість роботи з великими масивами даних роблять SNAP одним із ключових інструментів наукових досліджень, що стосуються радарного моніторингу територій [69].

Для подальшого аналізу результатів обробки радарних знімків було застосовано програмне забезпечення ArcGIS Pro, яке є сучасною професійною ГІС-платформою компанії Esri, призначеною для багатовимірного просторового аналізу, картографування та моделювання геоданих. ArcGIS Pro побудована на 64-бітній архітектурі, що забезпечує високу продуктивність при роботі з великими масивами растрів, включно з даними радарної зйомки Sentinel-1 [70]. Програма підтримує широкий спектр геопросторових форматів (GeoTIFF, NetCDF, HDF5, Esri Grid), дозволяючи інтегрувати попередньо оброблені продукти SNAP у комплексні аналітичні процеси. Однією з ключових переваг ArcGIS Pro є наявність великої кількості інструментів просторового аналізу, зокрема зональної статистики, класифікації, картографічного моделювання та роботи з багаточасовими наборами даних. Платформа містить

розвинуті можливості візуалізації: 2D- і 3D-режими, побудову карт, тематичне відображення, символогію за значеннями зворотного розсіяння та оформлення картографічних композицій. У середовищі ArcGIS Pro реалізовано інструменти аналізу змін, що дозволяє проводити порівняння різночасових радарних знімків, визначати ділянки пошкоджень та просторову структуру деградованих полів. Програма також підтримує роботу з Python-бібліотекою ArcPy, що забезпечує автоматизацію повторюваних операцій і створення складних геообчислювальних моделей. Завдяки інтеграції з ArcGIS Online та просторовими базами даних (Geodatabase, PostgreSQL/PostGIS) ArcGIS Pro дозволяє організувати централізоване зберігання та обмін результатами досліджень. Високий рівень точності обчислень, стабільність роботи з великими растровими наборами й розширені геоаналітичні модулі роблять ArcGIS Pro потужним інструментом для наукових досліджень пошкоджень сільськогосподарських угідь. Таким чином, використання ArcGIS Pro забезпечує комплексну інтеграцію, географічного аналізу та візуалізацію результатів радарної обробки, що дозволяє всебічно оцінити масштаб і просторову організацію ландшафтних порушень.

Для географічного дослідження території було обрано 2 методи попередньої обробки радарних знімків. Перший метод полягає в ідентифікації пошкоджених сільськогосподарських угідь автоматичним методом спираючись на результати індексу mRFDI (modified Radar Forest Degradation Index). Другий використання методу change detection для автоматичного знаходження згорівших полів за період активних наступальних дій [71].

Для застосування обох методів ідентифікації пошкоджень радарних знімків. Потрібно провести попередню обробку даних Sentinel-1 GRD у середовищі SNAP для подальшого розрахунку радарних індексів, оскільки сирі радарні дані не придатні для обробки, порівняння та кількісного аналізу.

Першим етапом була імпорт і попередня просторова вибірка зображення. Продукт Sentinel-1 у форматі SAFE/ZIP завантажувався через інструменти

імпорту SAR-даних, після чого виконувалася операція Subset, що дозволяло обмежити знімок межами досліджуваної території та уникнути обробки зайвих ділянок. Застосування Subset на початку обробки є доцільним, оскільки значно зменшує обсяг даних, знижує навантаження на пам’ять та скорочує час виконання подальших обчислень. Отриманий обрізаний продукт використовувався як основа для подальших операцій.

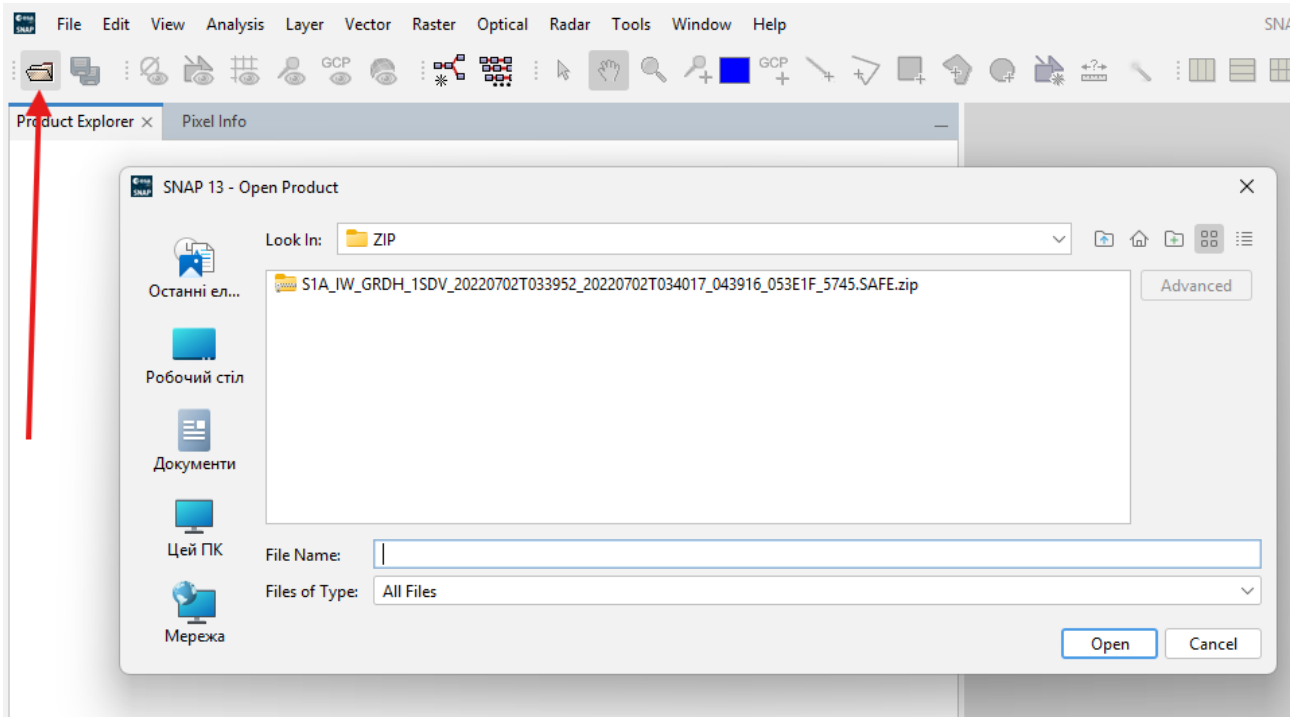

Рис. 2.15. Інструмент Open Product

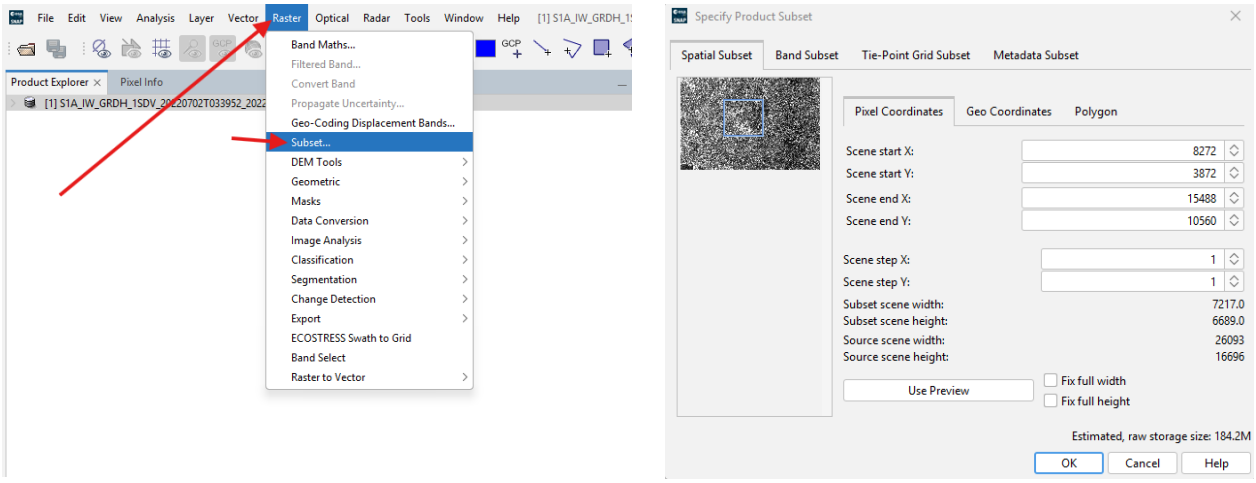

Рис. 2.16. Інструмент Subset

Наступним кроком була корекція орбітальних параметрів за допомогою інструмента Apply Orbit File. Дана процедура дозволяла завантажити та застосувати уточнені орбітальні вектори супутника, отримані після наземної обробки телеметрії. Використання точних орбіт є важливим аспектом забезпечення геометричної відповідності між різночасовими сценами, оскільки початкові орбітальні дані можуть містити похибки, що впливають на позиціювання об’єктів. Коректно застосовані орбітальні параметри забезпечують підвищену точність усіх наступних етапів, зокрема радіометричної калібровки та геометричної корекції. Після даного етапу збережений файл отримує додаткову приставку в кінці назви виділену червоним квадратом (Рис. 2.17).

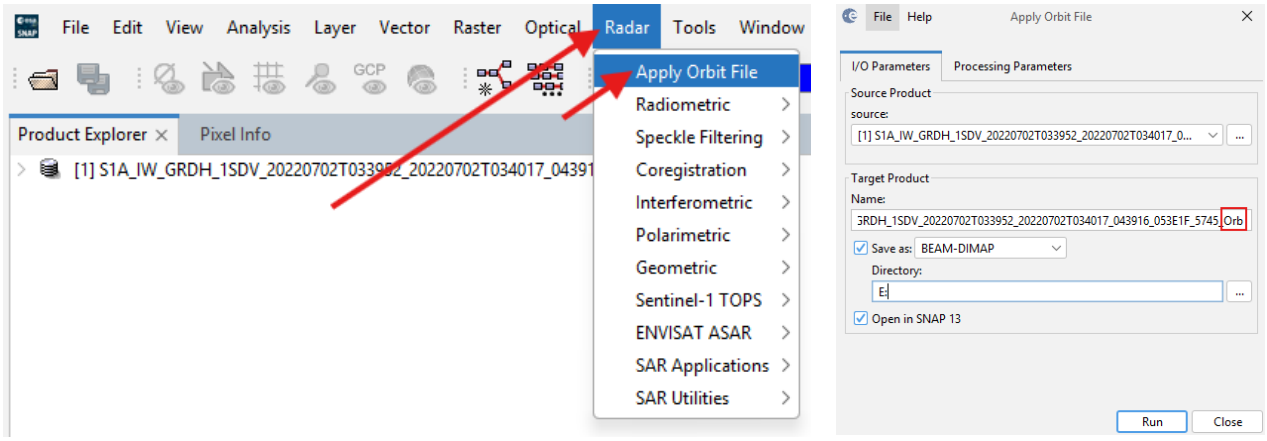

Рис. 2.17. Інструмент Apply Orbit File

Після уточнення орбіти виконувалося видалення теплового шуму (Thermal Noise Removal). Для продуктів рівня GRD наявність теплового шуму є характерною, і він проявляється як підвищений фон у крайових зонах сцени. Його усунення забезпечує рівномірність розподілу амплітудних значень та стабілізує фізичні параметри зворотного розсіяння. Це особливо важливо для подальших розрахунків індексів, чутливих до співвідношень між каналами VV і VH. Після даного етапу збережений файл отримує додаткову приставку в кінці назви виділену червоним квадратом (Рис. 2.18).

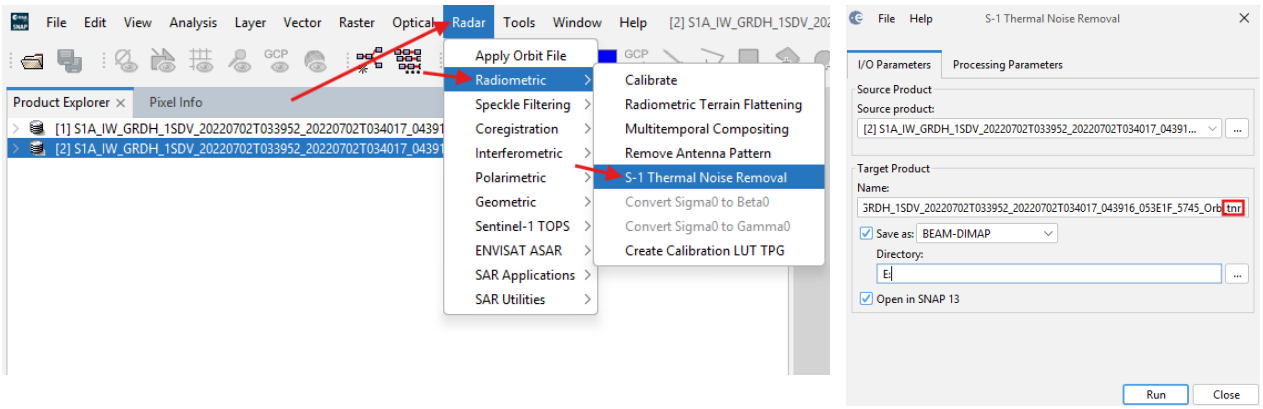

Рисунок 2.18. Інструмент Thermal Noise Removal

Одним із ключових етапів обробки була радіометрична калібровка зображення до коефіцієнта зворотного розсіяння σ^0. Операція Calibration переводить цифрові значення пікселів у фізично інтерпретовані показники поверхневого розсіяння, що дозволяє порівнювати сцени між собою незалежно від умов зйомки. У ході калібрування формувалися нові канали Sigma0_VV та Sigma0_VH. Важливим аспектом було отримання лінійних значень σ^0, оскільки саме вони використовуються для розрахунку більшості радарних індексів (RVI, RFDI, VV/VH та ін.). Калібровані значення зворотного розсіяння є основою для агромоніторингу, оцінки вологості ґрунту, аналізу текстурних характеристик поверхні та мультичасового аналізу. Після даного етапу збережений файл отримує додаткову приставку в кінці назви виділену червоним квадратом (Рис. 2.19).

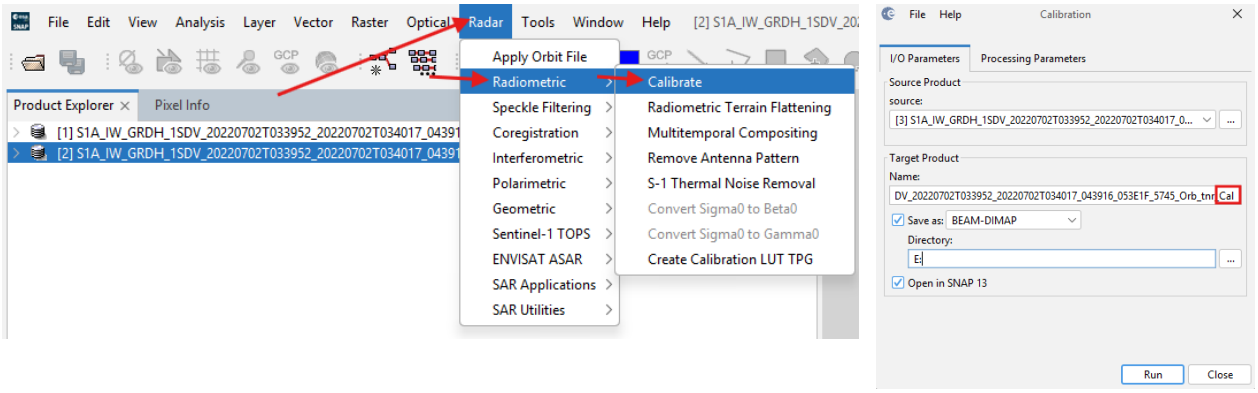

Рис. 2.19. Інструмент Calibration

Для зменшення мультиплікативного шуму SAR-зображення додатково піддавалися спекл-фільтрації. У дослідженні застосовувався адаптивний фільтр Lee або Refined Lee, який дозволяє знижувати інтенсивність спеклу без істотної втрати просторової інформативності. Фільтрація є необхідною, оскільки шум може спотворювати радіометричні характеристики пікселів і призводити до хибних відмінностей між різними ділянками. Коректна спекл-редукція підвищує точність індексів і стабільність класифікаційних алгоритмів. Після даного етапу збережений файл отримує додаткову приставку в кінці назви виділену червоним квадратом (Рис. 2.20).

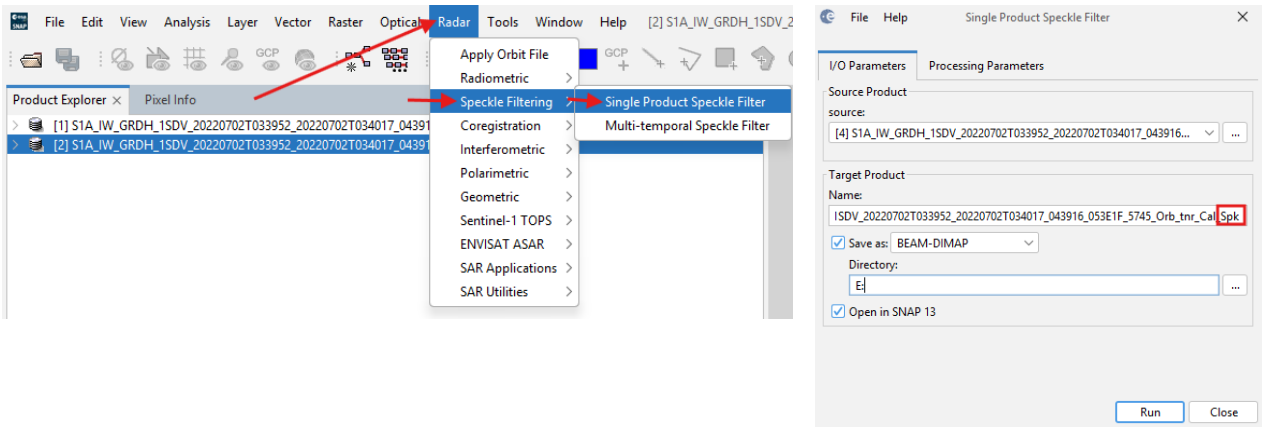

Рис. 2.20. Інструмент Single Product Speckle Filter

Завершальним етапом передобробки була операція Terrain Correction, що виконувалася за алгоритмом Range-Doppler Terrain Correction. Вона забезпечувала усунення геометричних спотворень, які виникають унаслідок специфіки радарної зйомки, зокрема ефектів прихилення (foreshortening), накидання (layover) та затінення рельєфом (shadow). У процесі корекції використовувалася цифрова модель рельєфу SRTM 1Sec, а вихідне зображення приводилося до вибраної картографічної проєкції (UTM відповідної зони). Terrain Correction забезпечила географічну прив’язку пікселів та формування рівномірної піксельної сітки, що дозволило використовувати скориговані значення σ^0 для зонального аналізу, порівняння з оптичними даними, change detection і розрахунку радарних індексів. Після даного етапу збережений файл

отримує додаткову приставку в кінці назви виділену червоним квадратом (Рис. 2.21).

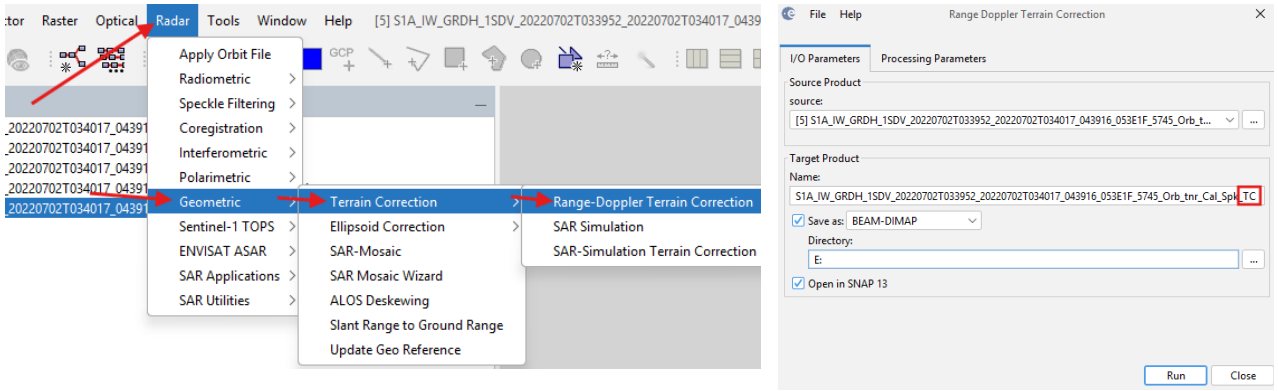

Рис. 2.21. Інструмент Range-Doppler Terrain Correction

У результаті виконання повної послідовності обробки був отриманий продукт, у якому канали VV і VH містили просторово вирівняні та радіометрично коректні значення коефіцієнта зворотного розсіяння.

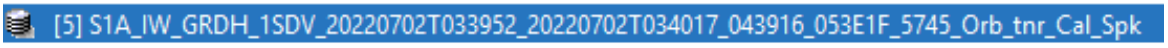

Рис. 2.22. Вигляд файлу вже обробленого радарного знімку

Саме цей продукт слугував основою для подальших розрахунків індексів, аналізу стану сільськогосподарських угідь, порівняння довоєнних і післявоєнних сцен, розрахунку індексу mRFDI, а також для процедури change detection. Вибрана методика відповідає міжнародним науковим стандартам і забезпечує відтворюваність результатів, що є критично важливим для географічних досліджень, виконаних на основі даних радарного дистанційного зондування.

Наступні кроки унікальні для кожного методу. Першим розглянемо застосування модифікованого індексу mRFDI, адаптований для даних Sentinel-1. Це пов’язано з тим, що класична форма RFDI ґрунтується на горизонтальних поляризаціях (HH та HV), які на супутниках Sentinel-1 відсутні, тоді як mRFDI застосовує вертикальні VV та VH, що робить його коректним для C-band SAR

цієї місії. Крім того, у традиційних підходах для розрахунку індексу використовується радіолокаційна яскравість γ^0 (gamma-nought), яка характеризує зворотне розсіювання, нормоване на площу поверхні з урахуванням рельєфу. Натомість у роботі застосовано σ^0 (sigma-nought) - зворотне розсіювання, нормоване на площу проєкції на горизонтальну площину. Хоча γ^0 є більш коректним параметром для територій із складним рельєфом, використання σ^0 є цілком допустимим для рівнинних і слабкорозчленованих ландшафтів. Оскільки досліджувана територія характеризується мінімальними вертикальними контрастами рельєфу, різниця між σ^0 та γ^0 є несуттєвою, а тому застосування σ^0 не впливає на якість індексу та забезпечує коректність отриманих результатів. Його значення зростають у разі зменшення об'ємного розсіяння, характерного для густої та незайманої рослинності, тому високі mRFDI свідчать про руйнування біомаси, спалювання, механічні пошкодження або оголення поверхні. Формула індексу дозволяє кількісно оцінити, наскільки сильно змінилася структура рослинного шару та чи збереглася його складність:

$$mRFDI = \frac{\sigma_{VV} - \sigma_{VH}}{\sigma_{VV} + \sigma_{VH}}, \quad (1)$$

де σ_{VV} - зворотне розсіювання, нормоване на площу проєкції у поляризації VV, а σ_{VH} - зворотне розсіювання, нормоване на площу проєкції у поляризації VH.

mRFDI є чутливим до таких порушень, як пожежі, вибухові воронки, сліди техніки та деградовані поля, де крос-поляризація різко зменшується через втрату хаотичних елементів рослинності. Завдяки своїй універсальності індекс ефективно застосовується не лише для лісових територій, а й для агроландшафтів, забезпечуючи надійну діагностику стану культур і ступеня деградації територій, уражених воєнними діями.

Цей індекс потрібно записати вручну в інструмент Band Math для розрахунків індексних значень, який викликається натисканням на шар правою кнопкою миші.

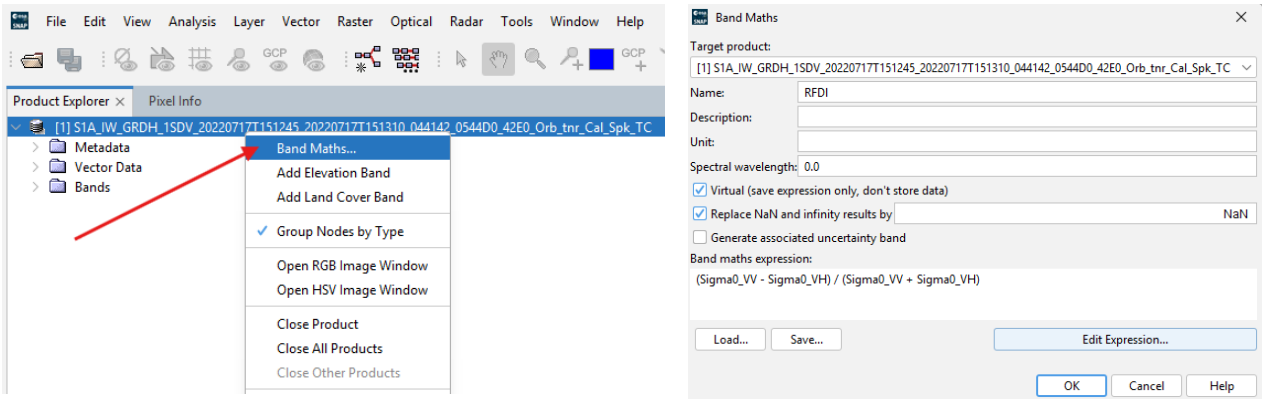

Рис. 2.23. Розрахунок mRFDI (modified Radar Forest Degradation Index) за допомогою інструмента Band Math

В результаті виконаних дій отримуємо розрахований індекс у вигляді додаткового каналу. Який потрібно інтерпретувати після чого він готовий до аналізу та створенню на його основі картографічних матеріалів.

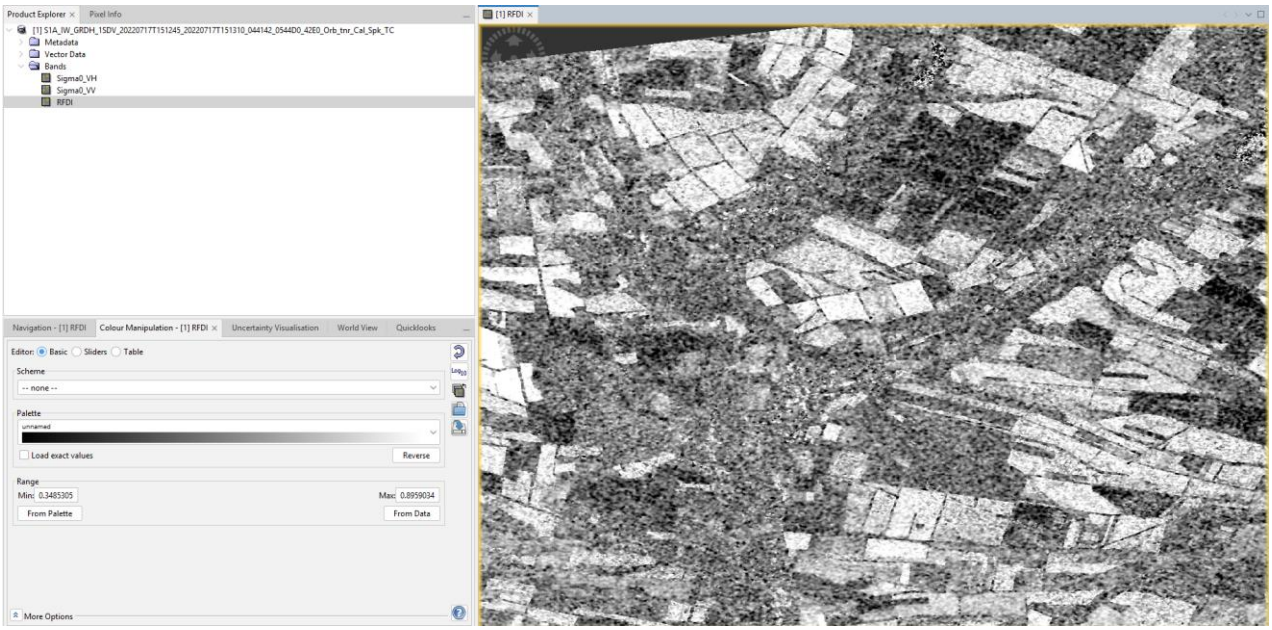

Рис. 2.24. mRFDI (modified Radar Forest Degradation Index)

Наступний крок – застосування метода change detection. Щоб розрахунки змін за визначений період були вірними необхідно додати амплітудні дані

зібрані за різні дати в один спільний stack. Для цього необхідно завантажити і обробити знімки за дві дати.

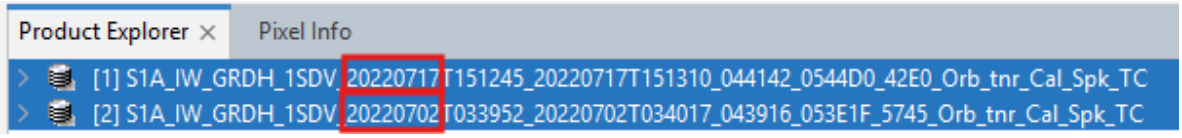

Рис. 2.25 Завантажені знімки

Далі, за допомогою інструмента Create Stack, об’єднати амплітудні дані за різні дати.

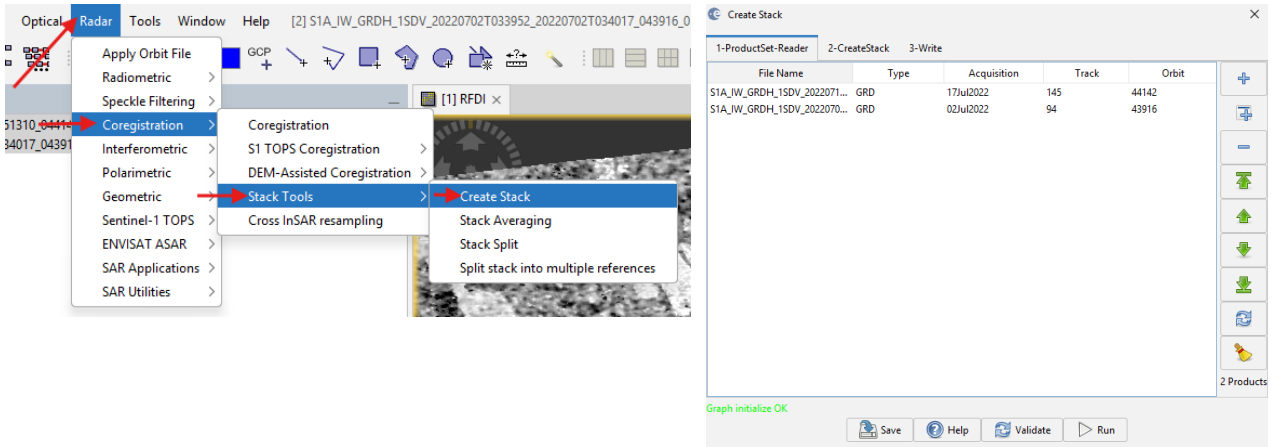

Рис. 2.26. Інструмент Create Stack

В результаті цієї операції отримуємо один файл в якому зібрані амплітудні дані необхідні для розрахунку change detection.

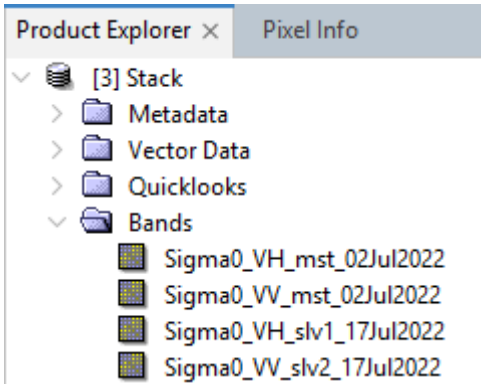

Рис. 2.27. Результат застосування інструменту Create Stack

Для коректнішого виявлення змін саме в рослинному покриві використовуємо поляризацію VH, тому що вона краще відображає стан

рослинності. За допомогою знайомого інструмента Band Maths за формулою розраховуються зміни.

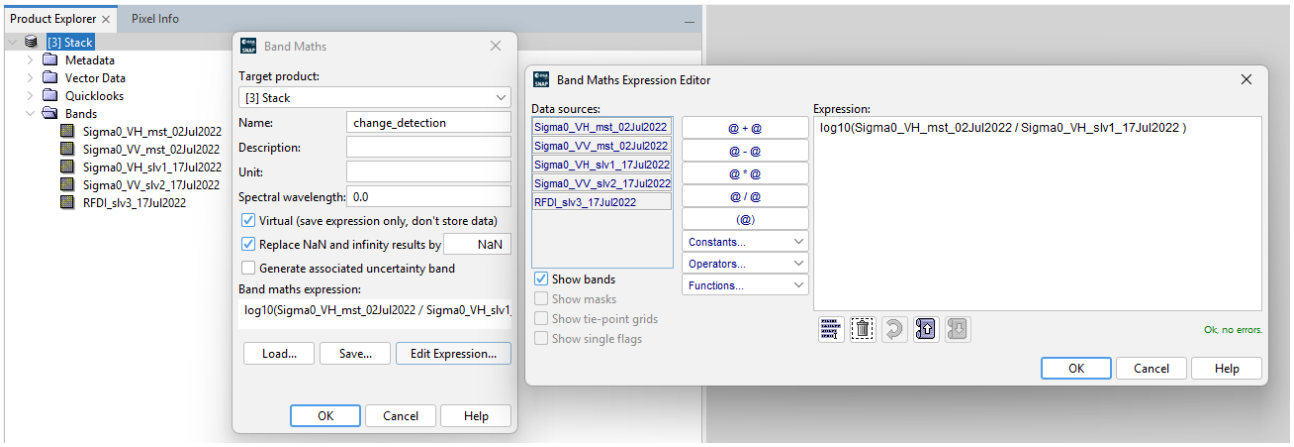

Рис. 2.28. Розрахунок change detection за допомогою інструмента Band Maths

У результаті повного циклу обробки радарних знімків Sentinel-1 GRD у середовищі SNAP сформовано високоточний, радіометрично відкалібрований та геометрично вирівняний продукт, що містить фізично коректні значення коефіцієнта зворотного розсіяння σ^0 у каналах VV та VH. Застосування орбіткорекції, видалення теплового шуму, радіометричної калібровки, спекл-фільтрації та Terrain Correction забезпечило точну географічну прив'язку пікселів, придатність даних до кількісного порівняння та усунення системних спотворень, притаманних сирим SAR-знімкам.

На основі підготовленого продукту були отримані два ключові типи аналітичних результатів. Першим є індекс mRFDI, який додається у вигляді окремого каналу та відображає ступінь структурної деградації рослинності. Розрахований індекс дозволяє кількісно виявляти зони зниження крос-поляризаційного сигналу, що є характерним для спалених, пошкоджених або оголених ділянок агроландшафтів. Таким чином, mRFDI забезпечує можливість просторової діагностики полів, які зазнали впливу бойових дій, наприклад пожеж.

Другим результатом є мультичасовий стек амплітудних даних, створений за допомогою інструмента Create Stack. Він містить вирівняні за геометрією

знімки за дві дати, що дозволяє коректно застосовувати процедуру change detection. На основі цього стеку було розраховано шар змін за допомогою Band Maths, що відображає різницю між зворотним розсіянням у поляризації VH у двох часових зрізах. Отриманий растр змін є індикатором активних деградаційних процесів, зокрема спалювання полів, втрати рослинного покриву, появи оголеного ґрунту або техногенних пошкоджень, характерних для періодів інтенсивних бойових дій.

У сукупності отримані продукти – радіометрично коректні канали σ^0, індекс mRFDI та растр змін – формують цілісну основу для подальшого інтерпретування в ArcGIS Pro та географічного аналізу досліджуваних територій. Вони дають змогу виявляти, картографувати та кількісно оцінювати ступінь пошкоджень сільськогосподарських угідь, порівнювати довоєнний і післявоєнний стан території та візуалізувати просторову структуру деградаційних процесів. Завдяки строго дотриманій процедурі обробки результати відповідають міжнародним стандартам і можуть використовуватися для географічних досліджень та картографування.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПОРУШЕНЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ НА ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ДАНИМИ SAR

3.1. Виявлення і оцінка пошкоджень на території дослідження за обраною методикою

Виявлення та кількісна оцінка ландшафтних порушень, спричинених воєнними діями, є ключовим етапом для розуміння реальних масштабів деградації територій та подальшого планування їх відновлення. У межах даного дослідження була проведена комплексна оцінка стану сільськогосподарських угідь Бахмутського району з використанням супутникових зображень та методів визначення змін (Change Detection), що дозволило ідентифікувати ділянки, пошкоджені пожежами та іншими факторами воєнного впливу. Загальна площа дослідження, охоплена супутниковими знімками, становить приблизно 851 км², що забезпечує повне просторове охоплення території бойових дій та прилеглих земель.

Застосування обраної методики дало змогу виокремити сільськогосподарські території, які зазнали суттєвих змін або були повністю знищені внаслідок пожеж. За результатами просторового аналізу встановлено, що площа таких порушених угідь становить 107,7 км², що свідчить про значні масштаби втраченого аграрного потенціалу району. Крім того, просторові патерни виявлених ушкоджень демонструють нерівномірний характер впливу бойових дій, із концентрацією критичних порушень у безпосередній близькості до ліній активних зіткнень. Додатковим фактором виступає тривале перебування територій під окупацією, що спричинило відсутність господарського догляду за землями та підвищення частоти вторинних пожеж.

Отримані картографічні матеріали та аналітичні дані створюють основу для поглибленої оцінки географічного та екологічного стану території.

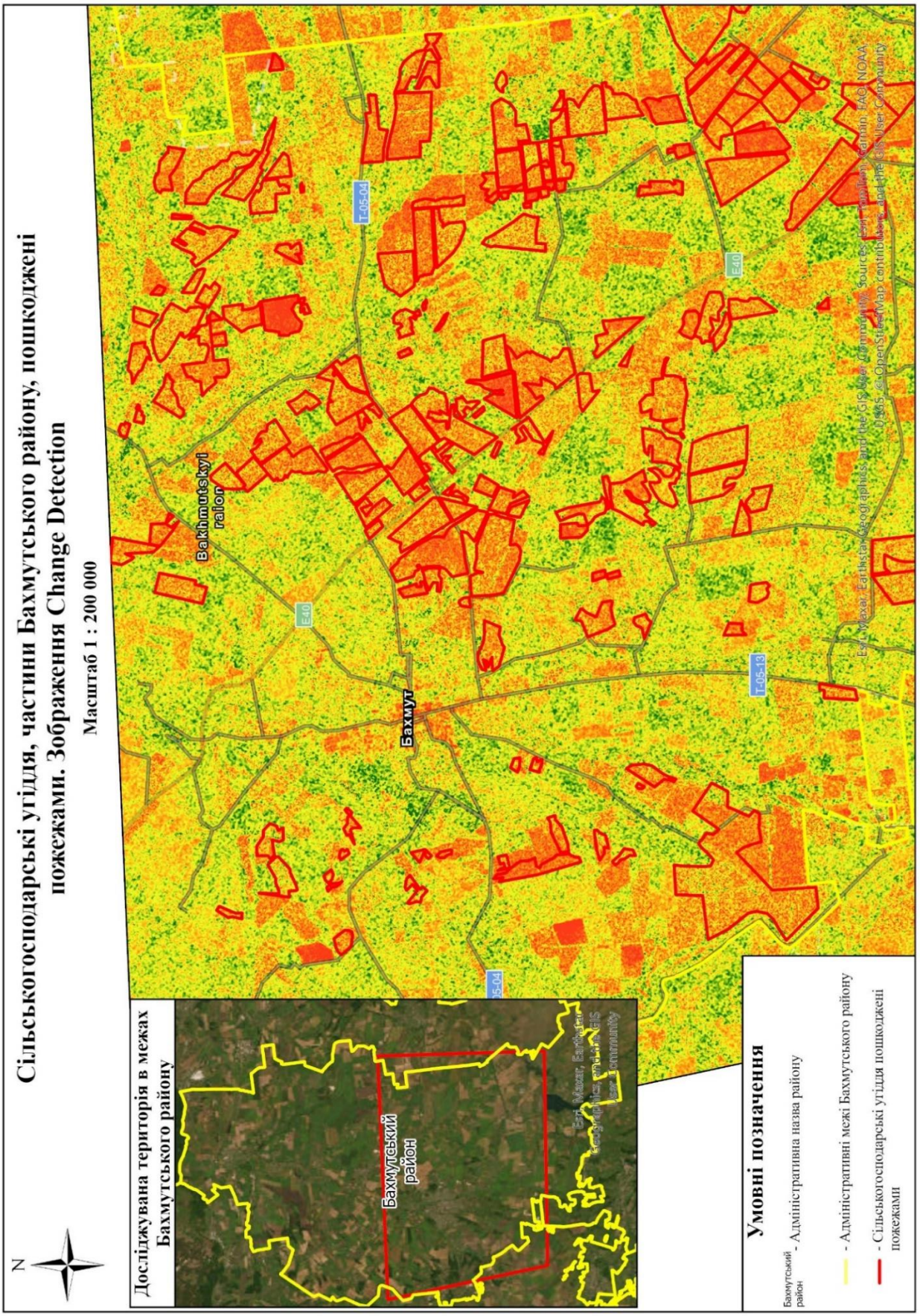

Рис. 3.1. Карта території дослідження за індексом mRFDI

Аналізуючи отриману карту з розрахованим mRFDI, можна визначити, що даний індекс ефективно виявляє місця з пошкодженою рослинністю. Для додаткового підтвердження результатів було використано оптичні зображення Sentinel-2, за якими було оцифровано всі сільськогосподарські угіддя в межах досліджуваної території. За даними mRFDI на території спостерігається висока концентрація пошкоджених ділянок у східній, північно-східній та частково південній частинах громади. Це пов’язано з тим, що саме на цих територіях безпосередньо велися бойові дії на момент проведення дослідження, і вони надалі залишалися зоною підвищеного ризику. Значна частина обведених контурів відповідає великим аграрним масивам. На цих ділянках спостерігається гомогенна структура радарного відгуку, що характерно для повністю вигорілої поверхні з максимальною втратою рослинного покриву.

Розподіл червоних радарних пікселів демонструє більш фрагментовану картину пошкоджень, оскільки індекс mRFDI чутливий не лише до згорілої рослинності, а й до інших типів деградації біомаси – висушування, механічного знищення, часткового вигоряння чи сильного порушення структури поверхні. У багатьох випадках червоні ділянки, що не обведені контурами, можуть відповідати скошеним або зораним полям, адже вони мають подібну шорсткість і, відповідно, схожий радарний відгук до вигорілих територій. Це підкреслює необхідність комбінування радарного аналізу з оптичними матеріалами, оскільки один тип даних не може забезпечити стовідсоткову достовірність класифікації.

У західній та північно-західній частинах громади радарні зміни мають менш виражений характер, що пов’язано з нижчою інтенсивністю бойових дій у цих районах та відсутністю значних пожеж на момент дослідження. Тут домінують зелені та жовті значення індексу, що відповідають збереженій або частково зміненій рослинності. Однак точкові червоні класи вказують на

локальні зони деградації, які можуть бути результатом окремих пожеж або техногенного впливу, зокрема пересування важкої техніки.

Примітно, що в межах деяких великих полів червоні пікселі утворюють компактні групи, що може свідчити про нерівномірність вигорання або про вплив додаткових чинників, таких як локальні вибухи чи повторні займання. Така особливість радарних даних була описана в теоретичній частині дослідження як властивість SAR-сигналу посилюватися на ділянках зі зміненою мікрошорсткістю поверхні. На таких територіях ґрунтовий покрив зазнав механічних руйнувань, що спричинює підвищений зворотний радарний сигнал, який алгоритм інтерпретує як ознаку деградації.

Частина червоних радарних пікселів межує з дорожньою інфраструктурою, що може бути наслідком руху військової техніки або вторинного випалювання узбіч, яке часто виникає під час обстрілів. У кількох секторах поблизу населених пунктів спостерігається поєднання радарних та візуально визначених пошкоджень, що свідчить про комплексну деградацію ландшафту та тривалі процеси зміни біомаси після пожеж. Ландшафтний контекст вказує, що значна частина цих полів до війни використовувалася для вирощування зернових культур, які мають однорідну структуру, а тому їх повне вигоряння спричиняє суттєву зміну радарного відгуку.

У центральній частині громади, ближче до міста Бахмут, радарні зміни мають мозаїчний характер, що відображає чергування ще збережених та вже пошкоджених сільськогосподарських територій. Це характерно для зон, де бойові дії були інтенсивними, але нерівномірними у просторі. Комбінація контурів і радарних класифікацій формує складну картину чергування високої та середньої деградації.

Зіставлення радарних та оптичних даних показує, що не всі пошкоджені рослинні масиви однаково чітко відображаються на SAR-зображеннях. Деякі вигорілі ділянки демонструють слабший радарний відгук, що може бути пов’язано з утворенням шару золи й попелу, який згладжує поверхню та знижує

інтенсивність зворотного сигналу. Це підкреслює важливість мультисенсорного підходу та комбінування різних методів ДЗЗ для детальної оцінки деградаційних процесів.

Загалом отримана карта демонструє, що площа пошкоджених сільськогосподарських угідь є значною – понад 100 км², – що істотно впливає на аграрний потенціал регіону. Просторовий характер пошкоджень засвідчує, що деградація має як суцільні, так і мозаїчні прояви, залежно від інтенсивності та тривалості бойових дій. Особливу увагу привертають великі аграрні масиви на сході громади, де пошкодження мають суцільний характер і займають десятки квадратних кілометрів. Інтеграція індексу mRFDI дозволила виділити не лише повністю зруйновану рослинність, а й частково деградовані ділянки, які не завжди фіксуються візуально. Це є важливою перевагою радарних даних у контексті моніторингу наслідків воєнних дій, особливо тоді, коли оптичні дані недоступні через хмарність або сезонні особливості.

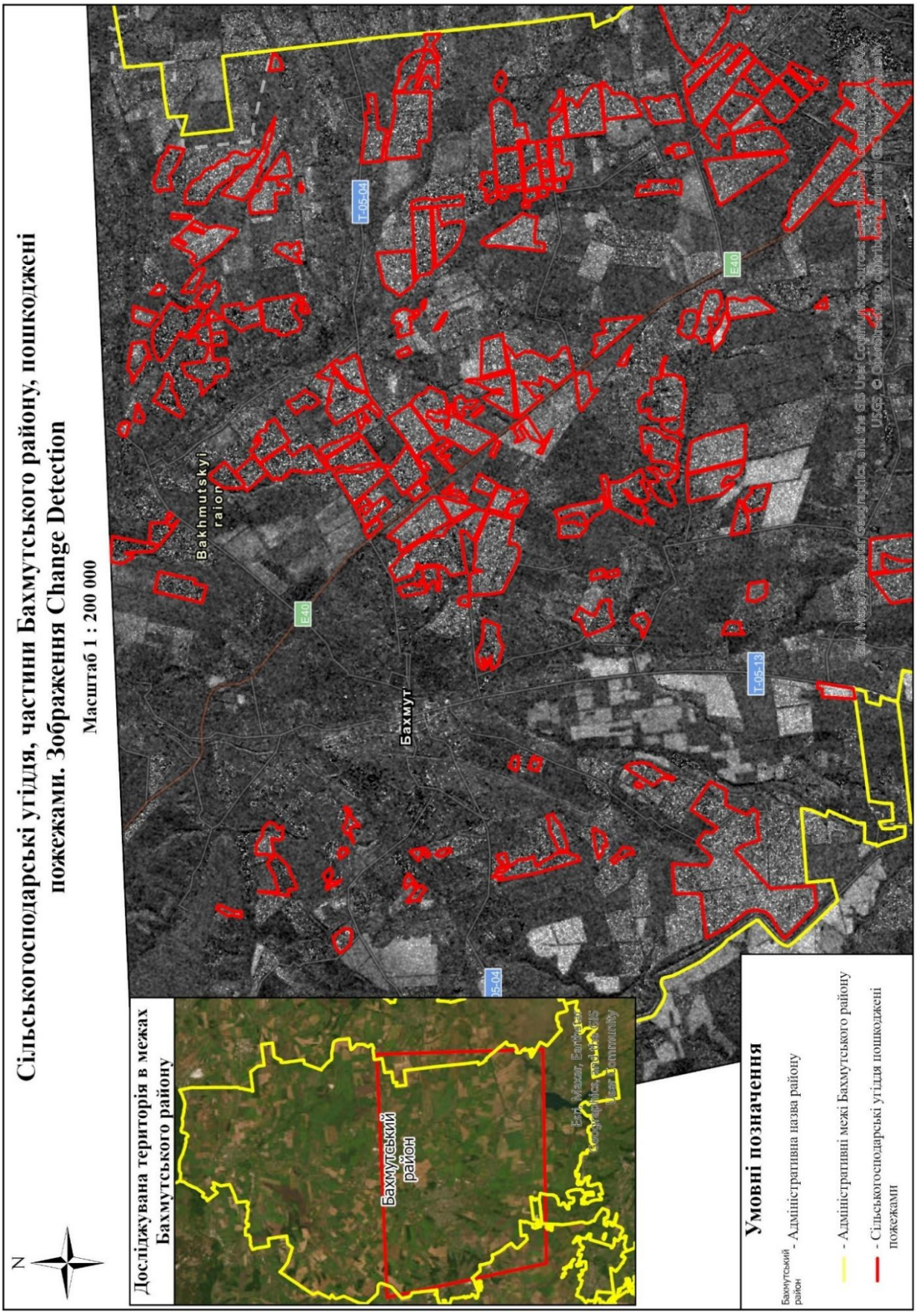

Рис. 3.2. Карта за різнецевим зображенням Change detection

Отримана карта Change Detection, сформована на основі двох радарних знімків Sentinel-1 за 02.07.2022 та 17.07.2022, наочно демонструє інтенсивність та просторовий характер змін, що сталися на поверхні за короткий проміжок часу. На відміну від оптичних матеріалів, де пошкоджені ділянки доводиться визначати вручну, радарне Change Detection відображає динаміку змін сигнатури зворотного розсіяння, яка напряму залежить від структури поверхні, шорсткості, вологості та стану рослинного покриву. На карті ця динаміка подана у вигляді варіацій яскравості: чим світліша ділянка – тим інтенсивніші та масштабніші зміни відбулися, а чим темніша – тим меншою була зміна між двома датами. Таким чином, чорні та майже чорні полігони відповідають стабільним територіям із мінімальними змінами, тоді як строкаті світлі патерни вказують на зони значних трансформацій.

Особливо важливо підкреслити, що темні однорідні ділянки не є пошкодженими – вони лише свідчать про стабільність радарного сигналу в період між 2 та 17 липня 2022 року. У таких випадках інтенсивність зворотного розсіяння майже не змінилася, а отже, індекс Change Detection має дуже низьке значення. Це є типовою поведінкою радарних знімків над полями, де не відбувалося активної аграрної діяльності, пожеж чи механічних руйнувань. Також до стабільних темних ділянок належать частини лісових масивів і природних лук, у яких поверхня залишається структурно однорідною протягом усього літа.

Світлі та строкаті ділянки, навпаки, відображають ті території, де радарний сигнал суттєво змінився через порушення ґрунту, вигорання рослинності, техногенну діяльність або бойові дії. Як і при застосуванні індексу mRFDI, найбільша кількість таких яскравих змін спостерігається у східній, північно-східній та частково південній частинах досліджуваної території Бахмутського району – саме там у липні 2022 року були інтенсивні бої. На цих ділянках Change Detection фіксує резонансні коливання радарного сигналу, що проявляються у вигляді строкатих світлих плям. Це характерно для вигорілих поверхонь, де

знищена рослинність змінює як шорсткість, так і діелектричні властивості ґрунту.

Більшість яскравих аномалій співпадає з вручну оцифрованими контурами пожеж, що підтверджує точність візуальної інтерпретації. Проте слід враховувати, що Change Detection реагує не лише на пожежі, а й на будь-які процеси, які змінюють характер відбиття мікрохвиль: пересування важкої техніки, вибухи боєприпасів, вторинне підпалювання стерні, локальні зміни вологості після опадів чи техногенних пошкоджень. Саме тому деякі ділянки, що показують яскраві зміни, не обведені контуром пожеж – вони можуть бути свіже скошеними полями. Скошена стерня має дуже схожі властивості до вигорілої рослинності: низька біомаса, оголений ґрунт, підвищена мікрошорсткість. Таким чином, радарний алгоритм справедливо визначає їх як змінені, хоча їх походження не пов’язане з горінням.

У західній частині громади, де бойова активність у цей період була низькою, домінують темні та напівтемні ділянки, що свідчить про практичну відсутність радарно фіксованих змін. Лише поодинокі світлі фрагменти можуть бути наслідком локальних процесів, а не масштабних пожеж. Центральна частина громади та райони навколо міста Бахмут демонструють складні мозаїчні патерни – чергування світлих і темних зон. Така неоднорідність зміни радарного сигналу вказує на просторову диференційованість бойових дій: одні території зазнали значного руйнування, тоді як сусідні ділянки залишалися доволі стабільними.

Порівняння карти Change Detection з результатами індексу mRFDI підтверджує їхню повну узгодженість: обидві методики виділяють ідентичні території максимальних змін. Це свідчить про високу інформативність радарних даних і про те, що аналізуючи лише дві дати радарної зйомки, можна отримати достовірну картину реальних змін на поверхні. Додатковою перевагою є те, що радарні дані не залежать від хмарності – а влітку 2022 року регіон Бахмута часто

був охоплений димом пожеж, що унеможливлювало використання оптичних даних для оперативного моніторингу.

Таким чином, розширений аналіз карти Change Detection свідчить, що методика надійно фіксує як масштабні пожежі, так і будь-які інші форми деградації поверхні. Світлі ділянки однозначно вказують на значні зміни у структурі та властивостях поверхні, тоді як темні полігони відображають стабільні зони. Це дозволяє чітко розмежувати пошкоджені та непошкоджені території, оцінити масштаб деградації сільськогосподарських угідь та забезпечити високий рівень достовірності результатів у рамках географічного аналізу воєнного впливу.

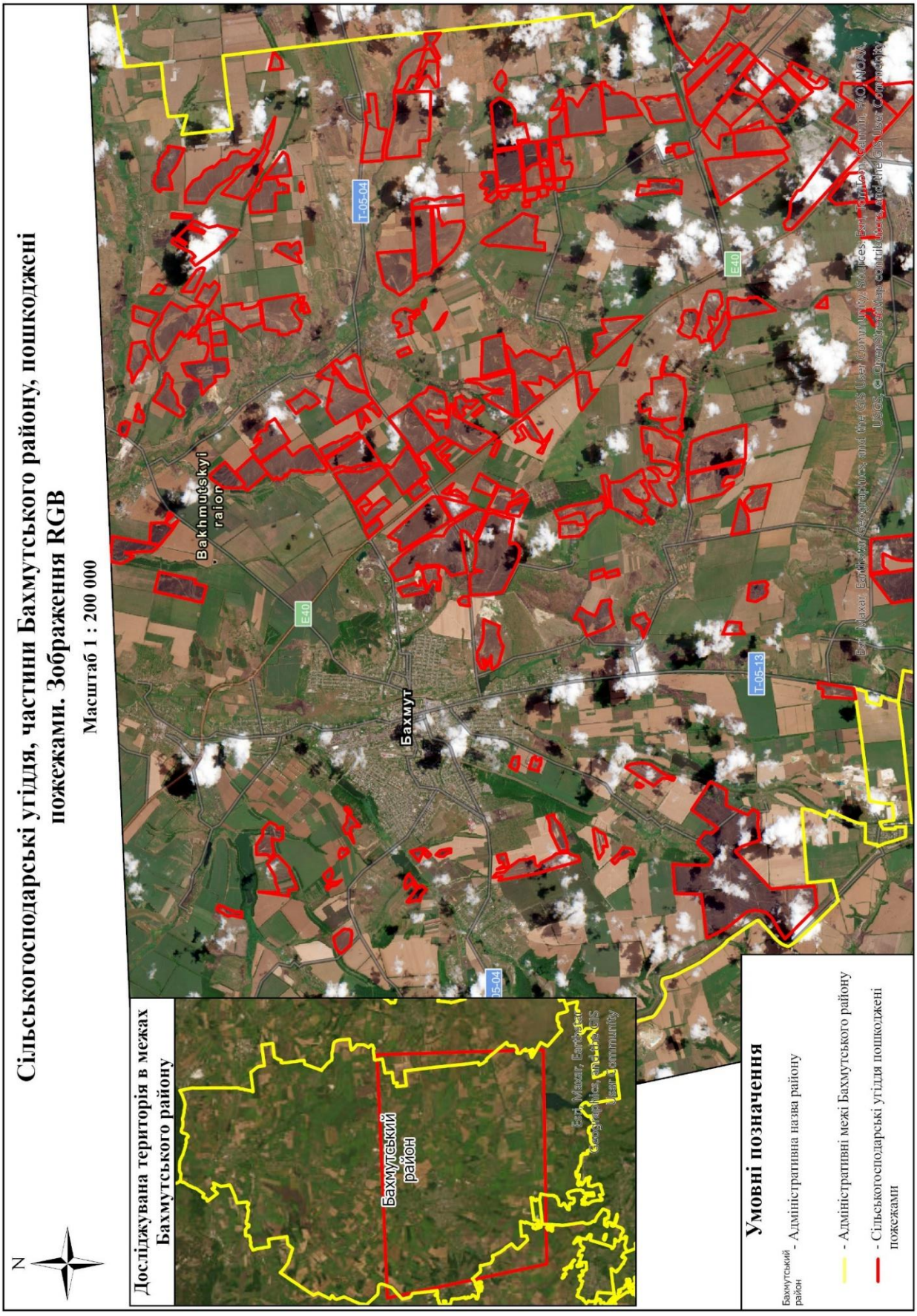

Рис. 3.3. Карта за оптичним зображенням в комбінації RGB

Отримане RGB-зображення Sentinel-2 за 17 липня 2022 року відображає реальний оптичний стан поверхні під час активної фази воєнних дій у Бахмутському районі. На карті чітко видно сільськогосподарські угіддя, що зазнали пожеж, які позначені червоними контурами й характеризуються темними, майже чорними або сильно «вигорілими» плямами. Такі ділянки мають значно знижений відбивальний сигнал у видимому спектрі через повне знищення рослинності, утворення шару попелу та оголення ґрунту. На оптичному знімку це проявляється як різке затемнення та відсутність будь-якої текстурної різноманітності, що є типовим індикатором свіжих або недавніх пожеж.

Найбільша концентрація згорілих ділянок спостерігається у східній і південно-східній частинах громади. Це ті самі території, де за супутниковими радарними даними (mRFDI і Change Detection) фіксувалося найбільше змін. На RGB-зображенні ці ділянки мають характерний темно-коричневий або чорний колір, що відповідає повному вигоранню рослинності. Багато з них мають неправильну форму та різну площу, що вказує як на точкові займання, так і на масштабні польові пожежі, спричинені обстрілами або тривалим горінням стерні.

На територіях, де пожежі лише частково зачепили поля, спостерігаються плямистість та строкатість: темні ділянки поєднуються зі світлішими зонами, що свідчить про нерівномірну інтенсивність горіння. Такі патерни підтверджують результати SAR-аналізу, де часткові зміни проявляли себе у вигляді «мозаїчних» радарних аномалій. Це особливо помітно в центрально-східній частині району, де пожежі мали складну конфігурацію, що може бути наслідком множинних точок загоряння або повторного займання.

У центральних районах громади, наближених до міста Бахмут, RGB-зображення демонструє мозаїчне чергування згорілих, неушкоджених та частково деградованих полів. Такий просторовий розподіл є типовим для територій із високою інтенсивністю бойових дій, де пожежі могли виникати повторно або локально внаслідок обстрілів. Частина полів має однорідні світло-

коричневі відтінки – це свідчить про зібраний урожай або свіжо оброблені землі, які за колірною структурою можуть бути схожими на слабко вигорілі території. Саме тому візуальна інтерпретація потребує уточнення за радарними даними.

На південному заході громади також спостерігається помітний масив пожеж, що відповідає раніше визначеним зонам пошкодження. Темні плями тут мають чіткі межі та великі площі, що характерно для масштабного неконтрольованого горіння. Додатково RGB-зображення показує наявність залишків диму або слідів гару, які є типовими влітку при високих температурах та сухій рослинності.

Північні та західні частини району на оптичному знімку переважно мають стабільні кольорові характеристики: зелені або світло-коричневі відтінки, що відповідають активним посівам або скошеним полям. Це підтверджує висновки радарного аналізу, де зміни в цих секторах мали незначну інтенсивність.

Помітною особливістю RGB-композиту є значна кількість хмарних масивів, які частково закривають фрагменти ландшафту. Попри це, оптичний аналіз дозволив точно оцифрувати пожежі там, де хмарність була мінімальною. Саме тому комбінування RGB-аналізу з радарним є критично важливим: SAR-дані дозволяють «зазирнути» під хмари і підтвердити або уточнити візуальну інтерпретацію.

У цілому RGB-зображення за 17.07.2022 є ключовим елементом верифікації: воно підтверджує межі згорілих ділянок, визначених за SAR-методами, та дозволяє коректно відокремити реальні пожежі від аграрних процесів (збирання, оранка), які радар іноді ідентифікує як зміни. Комбінація оптичних і радарних даних забезпечує найбільш повний і достовірний аналіз ландшафтної деградації на території Бахмутського району у літній період 2022 року.

3.2. Загальні риси порушень середовища та географічна оцінка впливу воєнних дій на територію за даними SAR

Аналіз радарних даних Sentinel-1 дозволяє відтворити просторову структуру та інтенсивність порушень, яких зазнали сільськогосподарські угіддя Бахмутського району внаслідок активних бойових дій. Хоча просторової роздільної здатності Sentinel-1 (близько 10 м для GRD-продуктів) недостатньо для прямої ідентифікації дрібних об’єктів, таких як окремі вирви, траншеї чи колії військової техніки, їхня присутність суттєво змінює фізичні властивості поверхні, а отже – і радіолокаційний відгук σ^0. Саме ці непрямі сигнальні ознаки дозволяють надійно фіксувати порушення, навіть якщо геометричні елементи не розрізняються візуально. Водночас для завдань географічного аналізу така роздільна здатність є цілком достатньою, оскільки ключові процеси – деградація рослинного покриву, порушення структури ґрунту, поява термічно уражених ділянок та зміна мікрошорсткості поверхні – проявляються не на рівні окремих об’єктів, а у вигляді чітких просторових патернів і контрастних зон, які добре реєструються радіолокаційним сигналом. Найточніше ж на даних Sentinel-1 проявляються термічні руйнування – вигорілі ділянки, оскільки пожежі повністю змінюють структуру рослинності та діелектричні властивості ґрунту, що різко впливає на рівень зворотного розсіяння та формує однозначні індикатори деградації.

Отримана карта mRFDI від 17.07.2022 відображає просторову інтенсивність деградації біомаси. Високі значення індексу (позначені червоним) відповідають осередкам із різким зменшенням об’ємного розсіяння у VH-поляризації, що характерно для знищеної, обпаленої або механічно порушеної рослинності. Ці ділянки формують чіткі кластери у центральній і південно-західній частині району, де влітку 2022 року відбувалися найактивніші бойові зіткнення. Завдяки високій чутливості до втрати хаотичних об’ємних структур mRFDI ефективно виявляє спалені площі, оголений ґрунт, вибиті вибухами

фрагменти поверхні та зони інтенсивного траншейного будівництва. Індекс демонструє високу результативність саме у географічному аналізі, оскільки воєнні порушення ландшафту проявляються не стільки у вигляді окремих дрібних об’єктів, скільки у формі великих просторових патернів – смуг, кластерів і зональних контрастів деградації. Таким чином, mRFDI дозволяє надійно виділити ключові території руйнування та відтворити загальну структуру впливу бойових дій на агроландшафти навіть у межах охоплення C-band Sentinel-1.

Застосування change detection між сценами 02.07.2022 та 17.07.2022 показало, що впродовж двох тижнів відбулися різкі просторові зміни радіолокаційних характеристик поверхні. На відповідній картограмі світлі ділянки свідчать про максимальні відмінності у рівнях σ^0, зокрема у VH-поляризації, де найбільш чітко відображаються зміни в надземній біомасі. Відмінності такого масштабу практично не можуть бути спричинені природними факторами у такому короткому часовому проміжку, тому вони однозначно вказують на антропогенні процеси – пожежі, вибухові навантаження, руйнування поверхні або переміщення техніки. З цього отримуємо інформативну основу для географічного аналізу, дозволяючи інтерпретувати не лише факт змін, а й їх просторову структуру, масштаб і характер у межах агроландшафтів, порушених воєнними діями.

Характерною особливістю аналізу SAR є те, що відносно невелика роздільна здатність Sentinel-1 не обмежує можливість виявлення великих та середніх деградаційних структур, оскільки радарний сигнал реагує не лише на геометрію об’єктів, а й на їхні фізичні властивості та зміни поверхневих характеристик. Хоча окремі воронки, лінії окопів чи вузькі колії техніки не завжди можна роздивитися на рівні пікселя, вони змінюють мікрошорсткість, локальну вологість, діелектричні параметри та геометричну структуру поверхні. Усі ці чинники впливають на механізми зворотного розсіяння, спричиняючи:

- зниження або підвищення σ^0, залежно від кута падіння хвилі та характеру порушення;
- появу контрастних локальних плям, які відображають різницю в мікрорельєфі чи стані ґрунту;
- зміну текстури у вигляді підвищеної зернистості або неоднорідності, спричиненої перемішуванням ґрунтових шарів чи руйнуванням структури рослинності;
- різкі амплітудні перепади на межах між порушеними та непорушеними ділянками, що добре фіксується за рівнем σ^0 у VV та VH.

Наприклад, траншеї та бліндажі створюють ефекти тіні та подовження (foreshortening), коли зміна нахилу поверхні відносно радіолокаційного променя призводить до зменшення або підсилення відбитого сигналу. Вирви, у свою чергу, формують комбінацію яскравих країв (через кутові ефекти та подвійне відбиття) та темного заглиблення (зона тіні), що створює характерний радарний контраст навіть тоді, коли розмір елемента менший за роздільну здатність пікселя. Сліди важкої техніки проявляються у вигляді лінійних зон зі зміненою шорсткістю та ущільненим ґрунтом, що змінює співвідношення поверхневого та об’ємного розсіяння.

Таким чином, попри те що жоден із цих елементів не відображається як окремий геометричний об’єкт у масштабі 10-метрового пікселя, їхній сумарний фізичний і структурний вплив формує впізнавану радарну “сигнатуру”, яка дозволяє надійно ідентифікувати порушені території. Саме тому Sentinel-1 залишається надзвичайно ефективним інструментом для географічного аналізу воєнно трансформованих територій: він фіксує не стільки окремі об’єкти, скільки їхній інтегральний вплив на стан поверхні, що й є ключовим для оцінки модифікацій агроландшафтів унаслідок бойових дій.

Порівняння результатів mRFDI та change detection дозволяє виділити кілька ключових типів воєнно зумовлених змін:

1. Термічні руйнування (пожежі) – найбільш чітко проявляються на Sentinel-1. Втрата рослинної біомаси, вигоряння надземної структури та зміна діелектричних властивостей ґрунту призводять до суттєвого зниження VH і підвищення mRFDI. Ці ділянки формують великі однорідні плями й виділяються практично безпомилково.

2. Механічні порушення поверхні – окопи, траншеї, вали, вирви та колії техніки. Хоча вони не відображаються як окремі геометричні об’єкти, їхня сумарна дія змінює мікрошорсткість і структуру поверхні. Це призводить до появи «смуг», мозаїчних текстур і локальних контрастів, які легко фіксуються на амплітудних даних.

3. Знищення біомаси внаслідок вибухів – проявляється у вигляді поєднання темних ділянок (тіні/вибиті поверхні) і яскравих контурів (застиглий ґрунт, обвалені краї воронок). Навіть у межах одного пікселя такі структури змінюють σ^0 настільки, що їх видно як радіометричний контраст на зміні дат.

4. Порушення водно-фізичних властивостей ґрунту – дія важкої техніки та вибухів створює зони із зміненою вологістю: ущільнені ділянки часто темніші, а свіжі вирви можуть затримувати вологу, формуючи яскравіші області.

У цілому результати SAR-аналізу підтверджують, що бойові дії зумовили глибоку трансформацію ландшафтної структури Бахмутського району. Втрата рослинності, зміна структури поверхні, руйнування ґрунтового профілю та поява техногенних рельєфних форм формують складну зону деградації, яка охоплює більшу частину досліджуваної території. Радарні індекси та багаточасовий аналіз змін дозволили кількісно оцінити масштаб порушень, окреслити їхню просторову організацію та визначити типи процесів, що вплинули на землю. Отримані результати формують основу для подальшої реконструкції стану угідь, оцінки ступеня деградації та планування заходів із рекультивації після завершення воєнних дій.

3.3. Верифікація результатів оцінки пошкоджень території дослідження за за допоміжними джерелами

Оцінювання ступеня пошкодження сільськогосподарських угідь за радарними методами потребує подальшої обов'язкової верифікації, оскільки індекси mRFDI та Change Detection фіксують будь-які зміни поверхні, незалежно від їх походження чи природи. З метою забезпечення максимальної достовірності підсумкових результатів у наступних етапах дослідження буде проведено порівняння отриманих радарних карт із оптичними супутниковими матеріалами високої роздільної здатності. Для цього передбачалося використання знімків PlanetScope з просторовою роздільною здатністю близько 3 м/піксель, що значно перевищує деталізацію Sentinel-2 та дозволяє розпізнати дрібномасштабні об'єкти і форми ландшафтних порушень.

Залучення даних PlanetScope є важливим етапом, оскільки візуальна інтерпретація високодетальних знімків дозволить підтвердити достовірність визначених зон пожеж, а також перевірити ті радарно виявлені ділянки, які не класифіковані як вигорілі, але демонструють ознаки деградації рослинності або зміни структури поверхні. Зокрема, планується встановити, чи є такі ділянки результатом руху військової техніки, прокладання окопів, локальних вибухів, механічного руйнування ґрунту або інших воєнних впливів, які також можуть спричиняти значну зміну SAR-сигнатури.

У ширшому контексті майбутня верифікація дозволить оцінити не лише окремі випадки пошкоджень, а й загальний характер трансформації агроландшафтів у зоні бойових дій. Використання даних PlanetScope у поєднанні з радарними методами забезпечить багаторівневий аналіз території: від фіксації змін у мікрошорсткості поверхні до ідентифікації антропогенних порушень. Такий підхід відповідає сучасним стандартам геоінформаційних досліджень, де особливу увагу приділяють комплексності даних, мультисенсорному порівнянню та методам незалежного підтвердження результатів.

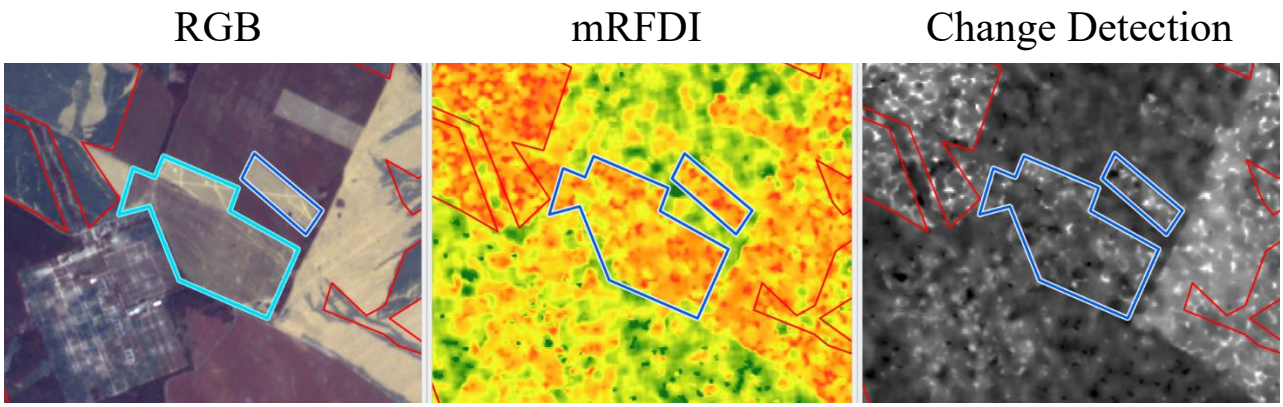

Рис. 3.4. Верифікація пошкоджень відмінних від пожеж (сліди техніки, обстріли)

На поданому фрагменті зображення, який включає порівняння RGB-знімка високої роздільності, індексу mRFDI та радарного Change Detection, простежуються важливі деталі, що підтверджують необхідність верифікації результатів, отриманих за допомогою SAR-даних. На RGB-зображенні (ліворуч) чітко видно світлі лінійні сліди, які з високою ймовірністю є накатаними коліями важкої техніки. Їхня геометрія, протяжність і напрямок свідчать про систематичний рух, а не природні або аграрні процеси. Крім того, на знімку можна ідентифікувати окремі світлі округлі плями, характерні для вирв від артилерійських чи авіаційних ударів. Такі вирви часто мають вищу відбивну здатність через оголений мінеральний ґрунт, відсутність рослинності та підсушену поверхню.

Обидва типи змін – і колії від техніки, і вирви – формують суттєву зміну структури поверхні, яку добре фіксують радарні методи. На центральному зображенні (mRFDI) в межах виділеного полігону спостерігаються підвищені значення індексу, що вказує на порушення однорідності рослинного покриву та мікрошорсткості ґрунту. mRFDI реагує не лише на вигорілу рослинність, а й на будь-яке руйнування біомаси, зниження її щільності або зміну вертикальної структури. Тому навіть у випадках, коли пожеж на Sentinel-2 не зафіксовано, радарний сигнал може демонструвати помітні відхилення.

На правому зображенні (Change Detection) радарні зміни проявляються як яскраві ділянки, що свідчать про істотну різницю сигналу між двома датами зйомки. На ділянках із коліями техніки та вирвами SAR-сигнал змінюється різко – через збільшення або зменшення шорсткості поверхні, зміни діелектричних властивостей ґрунту та порушення мікрорельєфу. Саме такі зміни алгоритм інтерпретує як значущі, навіть за відсутності слідів горіння у видимому діапазоні.

Важливо зазначити, що візуальний аналіз оптичного знімка підтверджує: на цій ділянці пожеж фактично не було. Поле має рівномірний світло-коричневий колір, властивий скошеним або частково зібраним посівам, без характерних темних тонів, які притаманні вигорілим площам. Проте присутність окремих світлих ліній і вибухових воронок пояснює, чому радарні індекси позначили цю ділянку як пошкоджену. Для радарного сенсора такі зміни є значущими, адже вони впливають на зворотне розсіяння сигналу не менше, ніж часткове вигоряння рослинності.

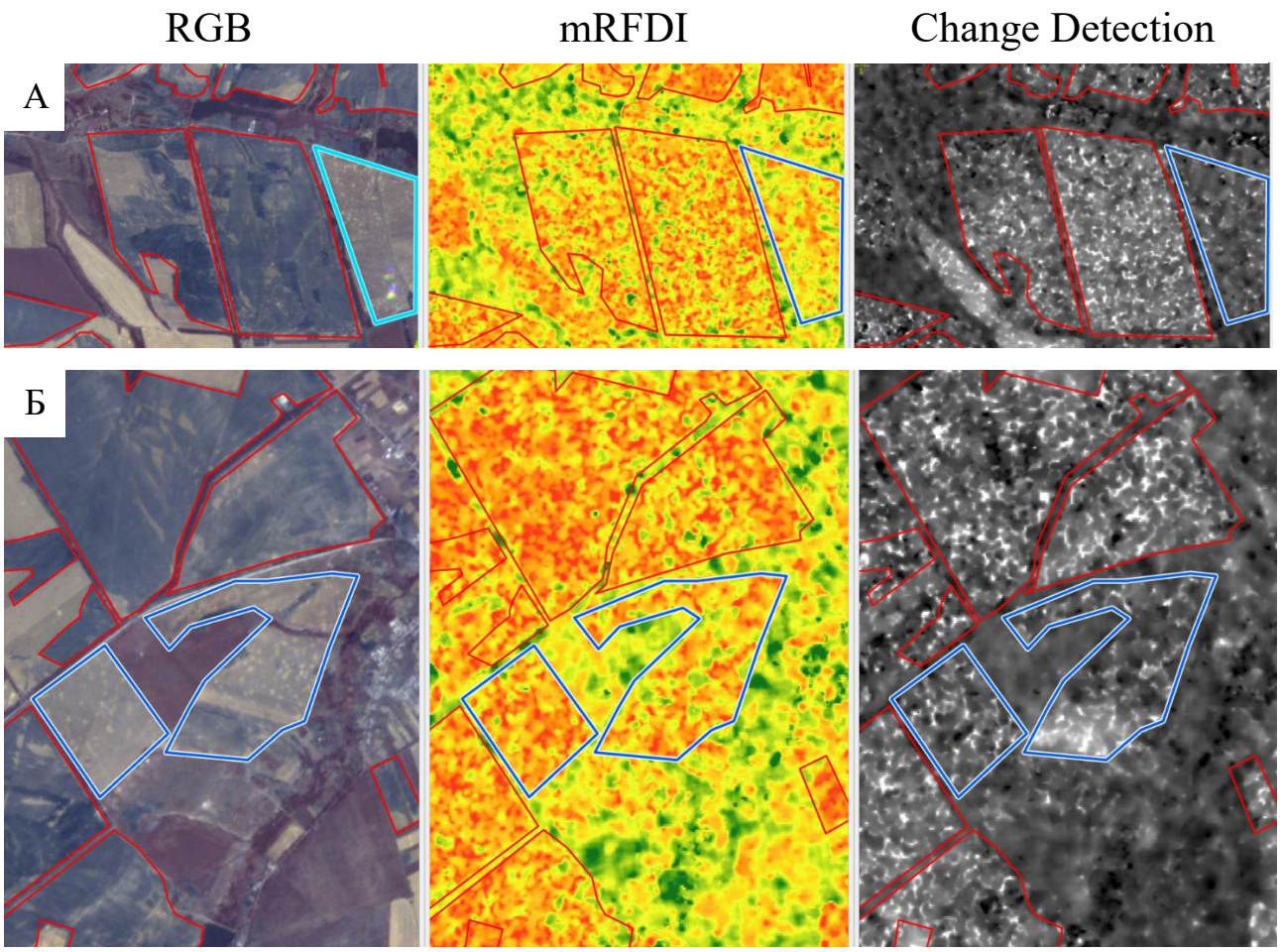

Рис. 3.5. А та Б. Верифікація пошкоджень відмінних від пожеж (місця активних бойових дій, обстріли)

На двох поданих фрагментах (Рис. 3.5, А та Б) спостерігається однаковий тип пошкоджень, характерний для територій інтенсивних бойових дій. На оптичних знімках добре помітні численні білі округлі або овальні плями, які мають типовий вигляд вирв від артилерійських та мінометних ударів. Вони розташовані рівномірно та густо, що свідчить про багаторазові обстріли ймовірно протягом тривалого часу. Просторова щільність таких вирв дозволяє ідентифікувати ділянки як території з найбільш активним вогневим впливом.

Висока концентрація вирв на RGB-зображенні чітко відповідає результатам радарних методів. На карті індексу mRFDI (центральний фрагмент) ці ділянки проявляються у вигляді червоних і жовтих зон, що свідчить про значні зміни у структурі рослинності та поверхні. У місцях сильного вибухового впливу

відбувається механічне руйнування ґрунту, зміна вологості, руйнування біомаси і формування різких мікрорельєфних контрастів. Кожен із цих факторів впливає на зворотне розсіяння мікрохвиль, спричиняючи значне підвищення індексу. Саме тому радарні методи відзначають такі ділянки як пошкоджені, навіть за відсутності ознак пожеж.

На радарному знімку Change Detection (права панель) ці ж території чітко проявляються як яскраві, строкаті патерни, що вказує на сильні зміни між двома датами зйомки. Вирви суттєво збільшують шорсткість поверхні, створюють різкі перепади висоти та змінюють діелектричні властивості оголеного ґрунту. Унаслідок цього SAR-сигнал від таких ділянок зазнає різких коливань, які алгоритм класифікує як сильні зміни. Висока інтенсивність світлих пікселів на Change Detection підтверджує масштаб руйнувань та численність вибухів.

Цікаво, що контури ділянок, які були визначені як пошкоджені індексними методами, не позначені як зони пожеж. Це свідчить про важливу закономірність: воєнні пошкодження не обмежуються вигорілою рослинністю, а включають широкий спектр деструктивних впливів, що відображаються на радарному сигналі не менш виразно. Вибухи боєприпасів формують чіткі, яскраві радарні відгуки, які можуть бути навіть інтенсивнішими за сигнатуру слабких пожеж.

У географічному контексті ці ділянки є прикладом зон екстремальної антропогенної трансформації, де природні процеси були повністю витіснені військовою діяльністю. Висока щільність вирв порушує дренажні властивості ґрунту, сприяє подальшій деградації рослинності, а інколи формує стійкі техногенні мікроландшафти. Такі території часто потребують подальшої рекультивації й оцінки рівня забруднення.

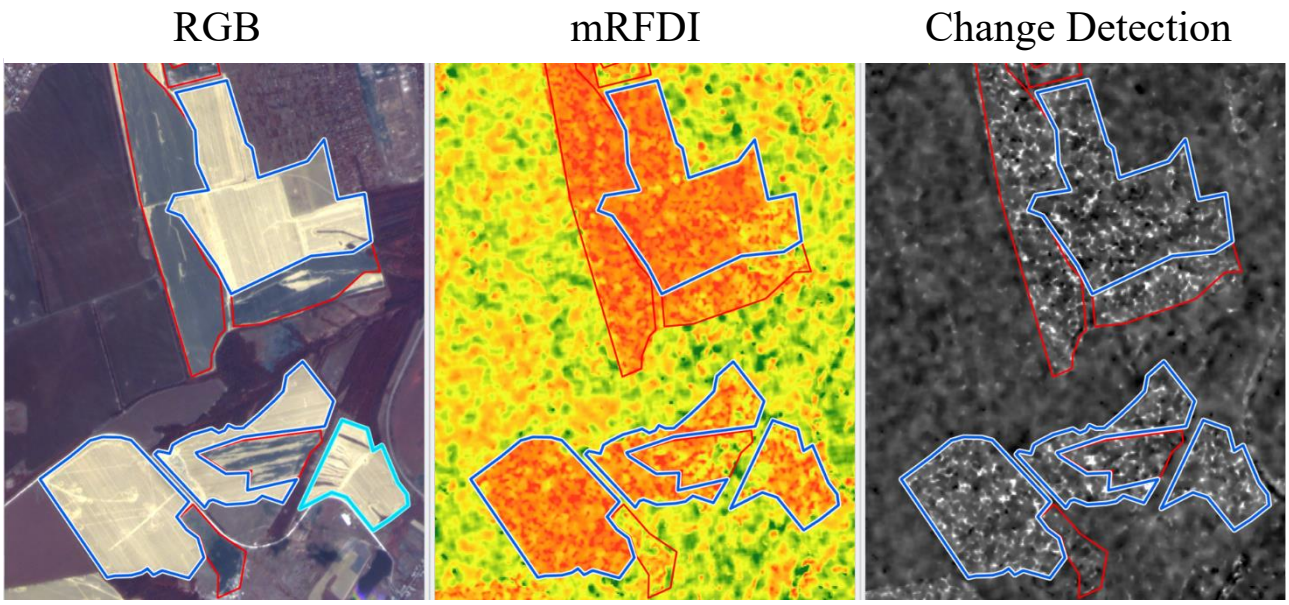

Рис. 3.6. Верифікація пошкоджень відмінних від пожеж (скошені поля)

Проведений аналіз показує (Рис. 3.6), що радарні індекси та методи реагують не лише на прямі наслідки бойових дій, але й на будь-які суттєві зміни стану рослинності або ґрунтової поверхні. На наведеному прикладі чітко видно, що поряд із територіями, які зазнали впливу вибухів, пожеж або руху техніки, радарні методи також виділяють скошені сільськогосподарські поля. Це закономірно, оскільки з позиції радарного сигналу такі поля характеризуються різкою втратою біомаси, зменшенням висоти рослинності та зміною структури поверхні, що відповідає тим самим принципам, за якими індекс mRFDI фіксує деградацію рослинного покриву. З точки зору формули індексу, скошування фактично є аналогом часткового вигорання рослинності, тому радарний відгук інтерпретує ці ділянки як потенційно пошкоджені.

Метод Change Detection демонструє подібну поведінку: у місцях, де між двома датами спостереження різко зменшується рослинний покрив, змінюється мікрошорсткість або оголюється ґрунт, алгоритм фіксує значні відмінності сигналу. Для радарних систем різниця між густими посівами та щойно скошеним полем є достатньою, щоб класифікувати її як істотну зміну. Саме тому на радіолокаційних картах такі ділянки «підсвічуються» яскравими значеннями так само, як і території, що зазнали бойових ушкоджень.

На RGB-знімку ці поля виглядають рівномірними, світлими та однорідними – типовими для періоду після жнив. Проте на індексній карті mRFDI вони проявляються у вигляді інтенсивних червоно-жовтих плям. Це є прямим наслідком того, що індекс чутливий до будь-якої втрати рослинної маси, незалежно від причини. На відміну від цього, радарний Change Detection підкреслює ділянки з різкою зміною відбивних властивостей поверхні: скошені поля мають специфічний радарний відгук, який виразно контрастує з густою рослинністю перед збиранням врожаю.

Таким чином, інтегроване використання радарних та оптичних даних підкреслює важливість правильної інтерпретації результатів. Хоча радарні індекси є надзвичайно ефективними у виявленні зон деградації, вони не здатні самостійно відрізнити пожежу від скошування, або вибухову вирву від агротехнічних робіт, якщо обидва процеси викликають подібні зміни у радарному сигналі. Саме тому верифікація за допомогою оптичних матеріалів є важливим етапом дослідження.

Отже, підсумовуючи результати, можна констатувати, що радарні дані успішно фіксують комплекс змін, пов’язаних із бойовими діями – пожежі, вибухи, рух техніки, механічне руйнування рослинності. Водночас вони також реагують на сезонні аграрні процеси, зокрема скошування або оранку, що потребує подальшої перевірки за оптичними знімками. Тільки їхнє поєднання дозволяє отримати максимально достовірну картину реальних пошкоджень, забезпечуючи правильне розмежування між воєнними та господарськими змінами в межах досліджуваної території.

3.4. Географічний аналіз впливу воєнних дій на сільськогосподарські угіддя за радарними даними

Радарні дані Sentinel-1, у поєднанні з індексом mRFDI та методом Change Detection, надали можливість здійснити комплексний географічний аналіз впливу воєнних дій на сільськогосподарські угіддя Бахмутського району. Виявлені зміни охоплюють широкий спектр деградаційних процесів, що виникли внаслідок пожеж, вибухів, руху важкої техніки, механічного руйнування ґрунтового покриву та вторинних аграрних робіт, які також впливають на радарний сигнал. Просторовий характер цих трансформацій формує складну картину, що відображає реальний стан ландшафтів у зоні інтенсивних бойових дій.

Одним із найбільш виражених наслідків стало масове вигоряння рослинності. За індексним аналізом площа пошкоджених пожежами угідь становить понад 107 км² з досліджених 851 км². На радарних картах ці ділянки проявляються у вигляді великих червоних масивів із максимальною втратою біомаси, що свідчить про повне або часткове знищення рослинного покриву. Географічно вони концентруються переважно у східній, північно-східній та частині південної частин громади, що відповідає зонам найактивніших бойових дій у липня 2022 року. Місцями пожежі мали мозаїчний характер, утворюючи локальні осередки вигоряння всередині великих аграрних масивів, що вказує на їх нерівномірну інтенсивність та повторюваність займання рослинності.

Важливим типом порушень стали вибухові зміни рельєфу, зокрема численні артилерійські та мінометні вирви. На більш деталізованих оптичних знімках PlanetScope вони проявляються як світлі округлі плями, що хаотично розташовані по поверхні полів. Радарний сигнал у таких місцях зазнає різких перепадів через зміну мікрорельєфу, порушення структури ґрунту та оголення поверхні. Алгоритм Change Detection фіксує такі ділянки у вигляді яскравих, строкатих патернів, які відображають сильні зміни між двома датами зйомки.

Концентрація вирв у східній частині громади свідчить про надзвичайно високу інтенсивність обстрілів, що перетворили окремі поля на антропогенно модифікований мікрорельєф із порушеним дренажем і стійкими деформаціями поверхні.

До суттєвих воєнних впливів належать також механічні зміни, спричинені рухом важкої техніки та облаштуванням фортифікаційних споруд. На оптичних знімках такі ділянки проявляються у вигляді світлих лінійних та криволінійних слідів, смуг руйнування або ділянок ущільнення ґрунту. Радарні алгоритми реагують на них як на різкі зміни мікрошорсткості поверхні, оскільки ущільнений або зрушений ґрунт по-іншому відбиває мікрохвилі. Це призводить до того, що мозаїчні або лінійні структури, спричинені технікою, виділяються яскравими плямами на Change Detection та червоними зонами на mRFDI. Подібні зміни особливо поширені вздовж під'їзних польових шляхів, на околицях населених пунктів та у зонах, де були активні дії військової техніки.

Особливої уваги потребує факт, що радарні індекси фіксують не лише воєнні, але й сезонні аграрні зміни. Скошені після жнив поля, нещодавно зорані ділянки або території із видаленою рослинністю мають схожі з пошкодженими ділянками радарні сигнатури. mRFDI інтерпретує скошування як «втрату біомаси», що призводить до появи інтенсивних червоно-жовтих плям навіть на незайманих війною полях. Метод Change Detection, своєю чергою, реагує на різку зміну відбиття між двома датами, внаслідок чого скошені поля також підсвічуються як «деформовані». Це підкреслює важливість поєднання радарних матеріалів із оптичною верифікацією, яка дозволяє розрізняти сільськогосподарські й воєнні трансформації.

Сукупний аналіз радарних зображень показує, що просторовий розподіл змін у межах громади має виражений зональний характер. Найпоширеніші та наймасштабніші порушення зосереджені у східній частині, де одночасно присутні пожежі, вирви, механічна деградація та повна втрата рослинності. Центральні території характеризуються мозаїчними змінами, що відображають

чергування непошкоджених і деградованих ділянок, а західні райони мають мінімальні зміни, що переважно пов’язані з аграрними процесами, а не з бойовими діями. Таким чином, радарні дані дозволили реконструювати просторову динаміку воєнних впливів, окресливши ділянки, що зазнали найбільшого антропогенного навантаження.

Отримані результати свідчать, що бойові дії призвели не лише до руйнування рослинності, але й до глибоких змін у структурі ґрунтів, мікрорельєфі та функціональній цілісності агроландшафтів. Втрата рослинної маси, формування техногенних мікроландшафтів, порушення водного режиму та деградація родючості створюють довгострокові ризики для відновлення сільськогосподарських територій. Радарні методи Sentinel-1, підтверджені верифікацією PlanetScope, виявили себе потужним інструментом для оцінки таких змін і дозволили сформувати науково обґрунтовану картину впливу воєнних дій на аграрні землі Бахмутського району.

ВИСНОВКИ

1. Проведене дослідження показало, що світовий та вітчизняний досвід використання радарних даних охоплює широкий спектр географічних задач – від моніторингу рослинності та ґрунтової вологи до фіксації руйнувань у зонах конфліктів. У міжнародній практиці SAR активно застосовується для оцінки стану природних і антропогенних комплексів під час кризових ситуацій, що підтверджує його високу надійність у регіонах із постійною хмарністю, димом чи обмеженим доступом до територій. В українських дослідженнях останніх років SAR-технології стали одним із ключових інструментів фіксації наслідків бойових дій, пожеж і деградаційних процесів на сільськогосподарських землях. Систематизація цього досвіду довела, що поєднання радарних даних із геоінформаційним аналізом забезпечує об’єктивну та відтворювану оцінку воєнних впливів на довкілля. Такий підхід дозволяє сформувати комплексну наукову основу для подальшого моніторингу порушених територій.

2. Аналіз природно-географічних умов Бахмутського району продемонстрував, що його сільськогосподарських угіддя характеризуються родючими ґрунтами, переважно вирівняним рельєфом і високою часткою орних земель. Саме ці особливості визначають чутливість території до воєнних дій, адже навіть локальні втручання радикально змінюють структуру поверхні. Типові види пошкоджень, виявлені у межах району, включають вирви від артилерійських ударів, суцільні та локальні пожежі, траншеї, оборонні споруди, розгортання важкої техніки, деградацію ґрунтового профілю та занепад рослинного покриву. Систематизація цих форм порушень дала змогу окреслити їхні характерні радарні сигнали, що стало основою для подальшої класифікації. Вивчення природної специфіки регіону дозволило точніше інтерпретувати результати обробки супутникових даних у контексті дослідження.

3. Обґрунтування вибору SAR-даних базувалося на їхній незалежності від сонячного освітлення та хмарності, що робить ці дані незамінними для дослідження територій із тривалими активними бойовими діями. Амплітудний

зворотний відгук σ^0, отриманий з Sentinel-1, відображає мікрошорсткість і структурний стан поверхні, які істотно змінюються під впливом вибухів, окопних робіт і пересування техніки. Радарний індекс mRFDI, застосований для дослідження, забезпечив змогу розрізняти оброблювані, деградовані та порушені ділянки з високою точністю. Таким чином, SAR виявився ефективним джерелом даних для оцінки стану сільськогосподарських угідь у районах, де оптичні знімки часто недоступні або спотворені. Крім того, його регулярний повторний період дає можливість простежувати динаміку змін.

4. У межах дослідження була розроблена та реалізована комплексна методика обробки SAR-даних, що включала калібрування, фільтрацію спеклу, корекцію за рельєфом та формування індексних карт. Подальше об'єднання різночасових знімків дало змогу виконати аналіз змін і виокремити ділянки з аномальною радарною поведінкою. Розрахунок радарних індексів дозволив створити тематичні карти, що відображають ступінь порушення ґрунтово-рослинного покриву. Отримані результати були верифіковані за допомогою оптичних даних, свідчень про бойові дії та логіки просторових процесів. Така методика забезпечила високу відтворюваність аналізу та дала можливість виявляти навіть ті пошкодження, які непомітні на оптичних знімках.

5. Узагальнення результатів дозволило встановити, що воєнні дії спричинили масштабні та різнорівневі порушення сільськогосподарських угідь досліджуваної частини Бахмутського району. Значна частина угідь перебуває у стані деградації або повністю втратила функціональність через вибухові дії й механічні руйнування. Аналіз радарних сигналів показав, що інтенсивність пошкоджень має виразну просторову структуру, яка корелює з напрямками наступальних та оборонних дій. Деякі ділянки демонструють стійкі ознаки деградації, що свідчить про довготривалий характер негативних процесів.

Географічна оцінка впливу воєнних дій показала, що змінений ґрунтово-рослинний покрив формує нові морфологічні елементи поверхні, що змінюють локальну екологічну рівновагу та потенціал для подальшого землекористування.

Пошкодження сільськогосподарських угідь не лише скорочують їх продуктивність, але й змінюють напрямки їхнього відновлення та природної динаміки. У результаті війна стала вагомим чинником, який визначає зміну ландшафтів і довготривалу трансформацію території. Зібрані дані підтверджують, що масштаб порушень є настільки значним, що вимагає системного моніторингу протягом наступних років.

Таким чином, робота виконала всі поставлені завдання та демонструє ефективність радарних даних, а також розробленої методики для незалежної, об’єктивної та стабільної оцінки стану сільськогосподарських угідь у воєнних умовах. Отримані результати можуть бути застосовані у просторовому плануванні, програмах відновлення, екологічних оцінках і моніторингу територій, що зазнали бойових дій.

СПИСОК ВИКОРИСАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петро Когут. Види Дистанційного Зондування: Переваги та Застосування. *EOS Data Analytics*. URL: https://eos.com/uk/blog/vydy-dystantsiinoho-zonduvannia/.

2. Aircraft Type Recognition in Remote Sensing Images Based on Feature Learning with Conditional Generative Adversarial Networks / Y. Zhang et al. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, no. 7. P. 1123. URL: https://doi.org/10.3390/rs10071123.

3. An introduction to optical satellite imagery. *UP42 Official Website*. URL: https://up42.com/blog/introduction-optical-satellite-imagery.

4. Agrawal S., Khairnar G. B. A COMPARATIVE ASSESSMENT OF REMOTE SENSING IMAGING TECHNIQUES: OPTICAL, SAR AND LIDAR. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019. XLII-5/W3. P. 1–6. URL: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-5-w3-1-2019.

5. A comparison of TerraSAR-X, RADARSAT-2 and ALOS-PALSAR interferometry for monitoring permafrost environments, case study from Herschel Island, Canada / N. Short et al. *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115, no. 12. P. 3491–3506. URL: https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.012.

6. Kogut P. D. P. How To Interpret Satellite Images: Methods, Elements & Uses. *EOS Data Analytics*. URL: https://eos.com/blog/how-to-interpret-satellite-images/.

7. Forest Cover Estimation in Ireland Using Radar Remote Sensing: A Comparative Analysis of Forest Cover Assessment Methodologies / J. Devaney et al. *PLOS ONE*. 2015. Vol. 10, no. 8. P. e0133583. URL: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133583.

8. Goers L., Ashton M. S., Tyrrell M. L. Introduction. *Managing Forest Carbon in a Changing Climate*. Dordrecht, 2011. P. 1–4. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-007-2232-3_1.

9. Cutler A., Cutler D. R., Stevens J. R. Random Forests. *Ensemble Machine Learning*. Boston, MA, 2012. P. 157–175. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9326-7_5.

10. Dalleau K., Couceiro M., Smail-Tabbone M. Unsupervised Extremely Randomized Trees. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Cham, 2018. P. 478–489. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93040-4_38.

11. Forest Cover Estimation in Ireland Using Radar Remote Sensing: A Comparative Analysis of Forest Cover Assessment Methodologies / J. Devaney et al. *PLOS ONE*. 2015. Vol. 10, no. 8. P. e0133583. URL: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133583.

12. NISAR L-band Synthetic Aperture Radar | NASA Earthdata. *NASA Earthdata*. URL: https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/l-sar.

13. Shevchuk S., Vyshnevskyi V. Use of Water Bodies for the Defense of Kyiv in the Course of the Russian-Ukrainian War. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Kyiv, Ukraine,. 2022. URL: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580029.

14. Nielsen A. A., Conradsen K., Skriver H. Polarimetric Synthetic Aperture Radar Data and the Complex Wishart Distribution. *Image Analysis*. Berlin, Heidelberg, 2003. P. 1082–1089. URL: https://doi.org/10.1007/3-540-45103-x_142.

15. Rice recognition from Sentinel-1 SLC SAR data based on progressive feature screening and fusion / S. Tian et al. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024. Vol. 134. P. 104196. URL: https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104196.

16. Evaluating SAR Radiometric Terrain Correction Products: Analysis-Ready Data for Users / A. I. Flores-Anderson et al. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, no. 21. P. 5110. URL: https://doi.org/10.3390/rs15215110.

17. Surface Water Body Detection in Polarimetric SAR Data Using Contextual Complex Wishart Classification / E. Goumehei et al. *Water Resources*

Research. 2019. Vol. 55, no. 8. P. 7047–7059. URL: https://doi.org/10.1029/2019wr025192.

18. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review / J. S. Lee et al. *Remote Sensing Reviews*. 1994. Vol. 8, no. 4. P. 313–340. URL: https://doi.org/10.1080/02757259409532206.

19. Multidimensional Evaluation Methods for Deep Learning Models in Target Detection for SAR Images / P. Wang et al. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, no. 6. P. 1097. URL: https://doi.org/10.3390/rs16061097.

20. Surface Water Body Detection in Polarimetric SAR Data Using Contextual Complex Wishart Classification / E. Goumehei et al. *Water Resources Research*. 2019. Vol. 55, no. 8. P. 7047–7059. URL: https://doi.org/10.1029/2019wr025192.

21. Review of synthetic aperture radar with deep learning in agricultural applications / M. G. Z. Hashemi et al. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2024. Vol. 218. P. 20–49. URL: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.08.018.

22. . Research advances of SAR remote sensing for agriculture applications: A review / C.-a. LIU et al. *Journal of Integrative Agriculture*. 2019. Vol. 18, no. 3. P. 506–525. URL: https://doi.org/10.1016/s2095-3119(18)62016-7.

23. Characterizing LEDAPS surface reflectance products by comparisons with AERONET, field spectrometer, and MODIS data / T. K. Maiersperger et al. Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 136. P. 1–13. URL: https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.007.

24. ML3 ThetaProble Soil Moisture Sensor - Dynamax. *Dynamax*. URL: https://dynamax.com/products/soil-moisture/ml3-thetaprobe-soil-moisture-sensor.

25. Filipponi F. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings*. 2019. Vol. 18, no. 1. P. 11. URL: https://doi.org/10.3390/ecrs-3-06201.

26. Potential of Sentinel-1 Radar Data for the Assessment of Soil and Cereal Cover Parameters / S. Bousbih et al. *Sensors*. 2017. Vol. 17, no. 11. P. 2617. URL: https://doi.org/10.3390/s17112617.

27. Effective roughness modelling as a tool for soil moisture retrieval from C- and L-band SAR / H. Lievens et al. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 15, no. 1. P. 151–162. URL: https://doi.org/10.5194/hess-15-151-2011.

28. On the potential of Sentinel-1 for sub-field scale soil moisture monitoring / T. C. van Hateren et al. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023. Vol. 120. P. 103342. URL: https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103342.

29. Tapete D., Cigna F. Urban remote sensing in areas of conflict: TerraSAR-X and Sentinel-1 change detection in the Middle East. *Fourth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment*, Paphos, Cyprus / ed. by K. Themistocleous et al. 2016. URL: https://doi.org/10.1117/12.2241442.

30. Russian-Ukrainian war impacts on the environment. Evidence from the field on soil properties and remote sensing / M. Solokha et al. *Science of The Total Environment*. 2023. P. 166122. URL: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166122.

31. Знищення Каховського моря: які наслідки російського екоциду для Запоріжжя та області. Перший Запорізький. Перший Запорізький. Новини Запоріжжя. URL: http://1news.zp.ua/znishhennya-kahovskogo-vodoshovishha-yaki-naslidki-dlya-zaporizhzhya/.

32. Підрив Каховської ГЕС: загрози та економічні наслідки. finance.ua. URL: ://finance.ua/ua/goodtoknow/pidryv-kahovskoi-ges#headline_5.

33. Sentinel 2A/2B. TVIS. URL: https://tvis.com.ua/ua/satellites/sentinel/.

34. Landsat 8. landsat science. Landsat Science. A joint NASA/USGS Earth observation program. URL: https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/.

35. Історія розвитку - Нікопольське управління захисних масивів дніпровських водосховищ. Нікопольське управління захисних масивів https

дніпровських водосховищ. URL: https://www.nik-up.gov.ua/istoriia-rozvytku/#:~:text=–%20максимальна%20ширина%20–%2024%20км;,за%20хронологічним%20порядком%20після%20Запорізької.

36. WorldView Series - Earth Online. *Earth Online*. URL: https://earth.esa.int/eogateway/missions/worldview.

37. The Use of VARI, GLI, and VIgreen Formulas in Detecting Vegetation In aerial Images / L. S. Eng et al. *International Journal of Technology*. 2019. Vol. 10, no. 7. P. 1385. URL: https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i7.3275.

38. Caprioli M., Scognamiglio A. METHODS FOR MULTITEMPORAL ANALYSIS OF SATELLITE DATA AIMED AT ENVIRONMENTAL RISK MONITORING. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. XXXIX-B7. P. 287–292. URL: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxix-b7-287-2012.

39. Бахмут. *ВУЕ*. URL: https://vue.gov.ua/Бахмут.

40. Бахмутський район. *ВУЕ*. URL: https://vue.gov.ua/Бахмутський_район (дата звернення: 22.11.2025).

41. Реалії Д., Тимошенко Д., Якубович Т. «Ми нарешті стали українцями»: як у місті, де працював більшовик Артем, сприймають війну. *Радіо Свобода*. URL: https://www.radiosvoboda.org/a/29552854.html.

42. Як війна вплинула на галузі сільського господарства Бахмутського району. *Бахмутська РДА*. URL: https://bahmutska-rda.gov.ua/news/1700379881/.

43. В Україні близько 5 мільйонів гектарів орних земель не використовуються через війну. Укрінформ - актуальні новини України та світу. URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3818267-v-ukraini-blizko-5-miljoniv-gektariv-ornih-zemel-ne-vikoristovuutsa-cerez-vijnu.html.

44. Як війна впливає на родючість ґрунтів та якість їжі?. Екодія. URL: https://ecoaction.org.ua/vijna-vplyvaie-na-grunty.html.

45. Основні джерела антропічного забруднення ґрунтів – урок. Біологія, 11 клас. МійКлас. URL: https://www.miyklas.com.ua/p/biologiya/11-klas/stalii-

rozvitok-ta-ratcionalne-prirodokoristuvannia-447189/antropichnii-vpliv-na-grunti-449782/re-793573fa-3884-4d6c-9873-de2b29972a9c (дата звернення: 09.04.2024).

46. Як російська війна шкодить українським ґрунтам – результати дослідження. Екодія URL: https://ecoaction.org.ua/grunty-doslidzhennia.html.

47. Вплив воєнних дій на ґрунт. НУБІП URL: https://nubip.edu.ua/node/121607.

48. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу / О. Голубцов, Л. Сорокіна, А. Сплодитель, С. Чумаченко – Київ: ГО "Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. – 32.

49. Гарасим А., Кельм Н. Шрами війни. Як влаштовані українські окопи на східному фронті (Інфографіка). Texty.org.ua - статті та журналістика даних для людей – Тексти.org.ua. URL: https://texty.org.ua/articles/101984/vkopani-u-kamin-yak-vlashtovani-ukrayinski-okopy-na-shidnomu-fronti/.

50. Al Jumaili A. A., Tout K., Makki Z. F. ICT-Based Smart Cities Planning: A Case Study of Rashid Camp. *Innovative Computing and Communications*. Singapore, 2024. P. 263–276. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-97-3591-4_22 .

51. History | Твоя бібліотека. *History | Твоя електронна бібліотека*. URL: https://uahistory.co/pidruchniki/zasekina-physics-and-astronomy-11-class-2019-profile-level/33.php.

52. A Review of Synthetic-Aperture Radar Image Formation Algorithms and Implementations: A Computational Perspective / H. Cruz et al. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 5. P. 1258. URL: https://doi.org/10.3390/rs14051258 .

53. ERS Radar Course 2 - Earth Online. *Earth Online*. URL: https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers/radar-courses/radar-course-2.

54. The SAR Handbook | NASA Earthdata. *NASA Earthdata*. URL: https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/sar-handbook.

55. Review of synthetic aperture radar with deep learning in agricultural applications / M. G. Z. Hashemi et al. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote*

Sensing. 2024. Vol. 218. P. 20–49. URL: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.08.018.

56. Tsuchiya Y., Sonobe R. Crop Classification Using Time-Series Sentinel-1 SAR Data: A Comparison of LSTM, GRU, and TCN with Attention. *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17, no. 12. P. 2095. URL: https://doi.org/10.3390/rs17122095.

57. Land Cover-Specific Local Incidence Angle Correction: A Method for Time-Series Analysis of Forest Ecosystems / D. Paluba et al. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 9. P. 1743. URL: https://doi.org/10.3390/rs13091743.

58. Unsupervised flood extent detection from SAR imagery applying shadow filtering from SAR simulated image / M. Vassileva et al. *IGARSS 2015 - 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Milan, Italy, 26–31 July 2015. 2015. URL: https://doi.org/10.1109/igarss.2015.7326372.

59. Seeing the world through SAR. *ICEYE*. URL: https://www.iceye.com/blog/seeing-the-world-through-sar.

60. Introduction to SAR - HyP3. *HyP3*. URL: https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction_to_sar/.

61. ERS Radar Course 1 - Earth Online. *Earth Online*. URL: https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers/radar-courses/radar-course-1.

62. Sentinel-1. *SentiWiki Home*. URL: https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentinel-1.

63. Satellite sensor raster types–ArcMap | Documentation. URL: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/satellite-sensor-raster-types.htm.

64. Щомісячні мозаїки Sentinel-1 - portalgis. *portalgis*. URL: https://portalgis.pro/kosmoznimki/1002/.

65. A Statistical Analysis for Intensity Wavelength-Resolution SAR Difference Images / G. H. Mittmann Voigt et al. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, no. 9. P. 2401. URL: https://doi.org/10.3390/rs15092401.

66. Lu Z., Meyer D. J. Study of high SAR backscattering caused by an increase of soil moisture over a sparsely vegetated area: Implications for characteristics of backscattering. *International Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23, no. 6. P. 1063–1074. URL: https://doi.org/10.1080/01431160110040035.

67. On the Soil Roughness Parameterization Problem in Soil Moisture Retrieval of Bare Surfaces from Synthetic Aperture Radar / N. Verhoest et al. *Sensors*. 2008. Vol. 8, no. 7. P. 4213–4248. URL: https://doi.org/10.3390/s8074213.

68. SNAP - Earth Online. *Earth Online*. URL: https://earth.esa.int/eogateway/tools/snap.

69. Tutorials – STEP. *STEP – Science Toolbox Exploitation Platform*. URL: https://step.esa.int/main/doc/tutorials/ .

70. Describe–ArcGIS Pro | Documentation. URL: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/functions/describe.htm.

71. RADAR-Vegetation Structural Perpendicular Index (R-VSPI) for the Quantification of Wildfire Impact and Post-Fire Vegetation Recovery / A. Chhabra et al. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 13. P. 3132. URL: https://doi.org/10.3390/rs14133132.