

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій імені С. З. Гжицького
Факультет землевпорядкування та інфраструктурного розвитку
Кафедра геодезії і геоінформатики

Кваліфікаційна (дипломна) робота

освітнього ступеня «Магістр»

на тему: **«МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБУДОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ
ЗА ДОПОМОГОЮ АНАЛІЗУ РАДАРНИХ ДАНИХ»**

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Виконав: студентка групи ЗВ-61

Ковальчук Ю. Я.

Науковий керівник: к.е.н., доцент

Рижок З. Р.

Рецензент _____

УДК 528.88:911.375

Методика дослідження забудованих територій за допомогою аналізу радарних даних. Ковальчук Ю.Я. Кваліфікаційна робота. Кафедра геодезії і геоінформатики. Львів, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, 2025 р.

55 с. текстової частини, 18 рисунків, 28 джерел бібліографічного списку.

У кваліфікаційній роботі розглянуто теоретичні засади та практичні приклади використання радарних даних (SAR) для аналізу урбанізованих зон, спираючись на досвід дослідження міста Львова. Представлено основні визначення, що стосуються структури та властивостей радарних супутникових знімків, специфіки SAR-поляриметрії, а також методи обробки таких даних. Окремо проаналізовано поляриметричні інструменти, які сприяють підвищенню точності аналізу структури забудови. Дано характеристику планувальній структурі міста Львова та обґрунтуванню актуальності використання SAR-даних для дослідження просторових особливостей міста. Описано процес підготовки вхідних даних, зокрема, вибір супутникових знімків ALOS PALSAR з відповідними параметрами для вивчення забудованих територій. Представлено результати практичного застосування поляриметричних методів у програмному середовищі SNAP. Детально висвітлено етапи попередньої обробки SAR-даних, виконання декомпозиції, класифікації типів забудови та створення тематичних карт щільності забудови.

Ключові слова: радарні дані, забудовані території, SNAP, класифікація типів забудови, супутникові знімки.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ РАДАРНИХ ДАНИХ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБУДОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ	8
1.1. Поняття радарних даних	8
1.2. Дослідження урбанізованих територій з використанням інструментів поляриметрії SAR	10
1.3. Обробка та аналіз даних SAR	16
2. АНАЛІЗ ЗАБУДОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ МІСТА ЛЬВОВА	21
2.1. Функціонально-планувальна структура міста Львова	21
2.2. SAR-поляриметрія як інструмент аналізу міської забудови Львова	24
2.3. Формування вхідних даних: вибір і отримання радарного знімка для аналізу забудованих територій міста Львова	27
3. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ SAR-ПОЛЯРИМЕТРІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ ЛЬВОВА	30
3.1. Попередня обробка SAR-даних	30
3.2. Виконання поляриметричної класифікації у програмі SNAP	38
3.3. Здійснення аналізу густоти забудови міста Львова	42
4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	47
ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53

ВСТУП

Актуальність дослідження зумовлена стрімким збільшенням урбанізації, необхідністю просторового моніторингу міських районів та посиленими вимогами до аналізу забудови в умовах обмеженого доступу до оптичних зображень, наприклад, через хмарність чи не достатню освітленість. В цьому контексті радарні супутникові системи, зокрема SAR – радар із синтезованою апаратурою, має значні переваги, оскільки забезпечує незалежність від погодних умов та часу доби, а також здатний фіксувати структурні характеристики поверхні.

Особливу цінність у вивченні урбанізованих територій має SAR-поляриметрія – напрям дистанційного зондування Землі, що дозволяє аналізувати характеристики об'єктів за допомогою багатоканального радарного сигналу, враховуючи поляризаційну поведінку відбитих хвиль. Серед ключових етапів поляриметричного аналізу – побудова матриць когерентності та коваріації, застосування декомпозиційних моделей (Freeman-Durden, Yamaguchi, Pauli, Touzi), фільтрація спекл-шуму та автоматична класифікація типів розсіювання.

Мета кваліфікаційної роботи – застосування методики SAR-поляриметрії для дослідження забудованих районів міста Львова на основі супутникового знімка ALOS PALSAR-1, з використанням програмного середовища SNAP, розробленого Європейським космічним агентством (ESA). В рамках дослідження буде реалізовано повний цикл обробки поляриметричних даних, у тому числі від попередньої обробки до візуалізації й інтерпретації результатів.

Алгоритм виконання дослідження включає наступні етапи:

1. завантаження супутникового знімка ALOS PALSAR-1 з порталу NASA;
2. імпорт та підготовка знімка у програмі SNAP, включаючи радіометричне калібрування, геокодування та обрізку зони інтересу;

3. побудова матриць когерентності та коваріації, як основи для поляриметричного аналізу;
4. застосування спекл-фільтрації для зменшення радарного шуму;
5. декомпозиція сигналу за допомогою моделей Freeman-Durden, Yamaguchi, Pauli, та Touzi для визначення типів розсіювання (поверхнєве, об'ємне, або подвійне);
6. поляриметрична класифікація;
7. створення комплексної матриці та обчислення параметрів для імітації компактної поляриметрії;
8. проведення аналізу щільності забудови м. Львова та його околиць на основі отриманих поляриметричних дескрипторів;
9. візуалізація результатів;
10. експорт продукту у форматах .GeoTIFF та .KMZ, а також перегляд у Google Earth Pro.
11. збереження фінального результату для подальшого використання в ГІС-середовищі або аналітичній роботі.

Одержані результати можливо застосовувати при просторовому розмежуванні типів забудови, побудови карт щільності забудованих територій за допомогою можливостей SAR-поляриметрії, як ефективного інструменту для урбаністичних досліджень.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ РАДАРНИХ ДАНИХ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБУДОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

1.1. Поняття радарних даних

Радарні дані (англ. radar data) – це інформація про земну поверхню, зібрана за допомогою радарів із синтезованою апертурою (SAR – Synthetic Aperture Radar). Цей вид даних належить до класу активного дистанційного зондування Землі, оскільки джерелом електромагнітного випромінювання є сам космічний сенсор, а не сонячне світло, яке відбивається. SAR-сенсори функціонують у мікрохвильовому діапазоні, що дає змогу проводити спостереження незалежно від погодних умов, хмарності, або часу доби [2].

На відміну від пасивних сенсорів, що реєструють відбите сонячне світло (наприклад, оптичні супутники), SAR-системи самостійно випромінюють мікрохвильові сигнали, які після взаємодії з об'єктами на поверхні Землі повертаються до приймача супутника. Це дозволяє отримувати зображення навіть за повної хмарності, відсутності сонячного освітлення чи будь-яких атмосферних перешкод.

Основними характеристиками, які описують радарні дані, є:

- інтенсивність сигналу (backscatter) – це міра кількості енергії, яка відбивається назад до датчика. Вона залежить від шорсткості поверхні, кута падіння, вологості ґрунту та інших чинників;
- фазова інформація – використовується для інтерферометрії (наприклад, моніторинг деформацій або створення цифрових моделей рельєфу).
- поляризація – орієнтація електромагнітного поля хвилі. Ця характеристика дає змогу розпізнавати різні типи об'єктів (наприклад, відрізняти рослинність, водойми та споруди) [13].

Радарні дані можуть бути різного рівня обробки:

1. RAW (сирі дані) – не оброблені дані, що потребують комплексної попередньої обробки.

2. SLC (Single Look Complex) – містять амплітуду та фазу сигналу. Використовуються для інтерферометрії та поляриметрії.

3. GRD (Ground Range Detected) – інтенсивність сигналу без фазової складової. Орієнтовані на візуальний аналіз та класифікацію.

4. GTC / GEC – геокодовані продукти з корекцією рельєфу та спотворень.

Радарні дані є надійним джерелом просторової інформації, яке можна використовувати для дослідження динамічних змін у ландшафті, виявлення штучних об'єктів, контролю використання земель та урбаністичних досліджень.

Для вивчення забудованих територій особливо корисними є повно поляриметричні SLC-дані. Вони надають можливість аналізувати типи розсіювання, структуру забудови, визначати щільність забудови та її просторове розташування.

SAR базується на принципі радіолокації: датчик випромінює мікрохвильовий імпульс, який відбивається від земної поверхні й надходить назад до приймача. Вимірюючи час затримки сигналу, його амплітуду, фазу та поляризаційні характеристики, система формує зображення з просторовою роздільною здатністю до кількох метрів. Застосування синтезованої апаратури значно збільшує якість сигналу, імітуючи велику антену, шляхом інтегрування сигналів, отриманих під час руху супутника. Для поляриметричних досліджень зазвичай використовуються SLC-дані з повною або подвійною поляризацією [15].

Ключовою характеристикою SAR-даних є поляризація – це орієнтація електричного поля хвилі. Найчастіше використовуються горизонтальна (H) та вертикальна (V) поляризації у таких комбінаціях:

- HH – горизонтальна передача та прийом;
- VV – вертикальна передача та прийом;
- HV, VH – крос-поляризації.

У повно поляриметричних знімках (quad-pol) доступні всі чотири комбінації, що дає змогу аналізувати типи розсіювання: поверхневе, об'ємне, подвійне (характерне для міських територій).

Радарні супутникові дані мають декілька важливих переваг перед оптичними даними:

- ✓ незалежність від хмарності – SAR проникає крізь хмари, туман та пил;
- ✓ нічне знімання – джерело сигналу є автономним;
- ✓ інформативність – окрім інтенсивності, доступні фазові та поляризаційні характеристики;
- ✓ висока точність – можливість інтерферометричного та поляриметричного аналізу.

Завдяки цим перевагам SAR-дані є надзвичайно корисними для моніторингу забудови, виявлення змін, аналізу інфраструктури, оцінки деформацій та геоінженерного моделювання.

Найбільш відомі супутникові платформи, які надають SAR-дані:

- Sentinel-1 (ESA) – це безкоштовні SAR-дані з подвійною поляризацією VV+VH або HH+HV.
- ALOS-1 / ALOS-2 (JAXA) – повно поляриметричні дані PALSAR, придатні для міських досліджень.
- TerraSAR-X, TanDEM-X (DLR) – з високою роздільною здатністю, мають комерційний доступ.
- RADARSAT-2, RCM (Канада) – широке охоплення, підтримка компактної поляриметрії [21].

1.2. Дослідження урбанізованих територій з використанням інструментів поляриметрії SAR

Урбанізовані території відзначаються складною організацією, різноманіттям та щільною забудовою. Ефективний моніторинг таких зон потребує методів дистанційного зондування Землі, здатних забезпечити

високу роздільну здатність, не залежність від атмосферних перешкод і можливість автоматизованого аналізу. Поляриметрична інтерпретація супутникових радарних даних (SAR) є одним з найефективніших інструментів для вирішення цих викликів.

Водночас, коли більшість застосовують дистанційне зондування Землі на основі супутникових знімків з оптичними даними з супутників Landsat, помірної роздільної здатності NASA (MODIS) і Sentinel-2 Європейського космічного агентства, існує ще один вид даних дистанційного зондування Землі – хвильові дані, а саме радіолокація із синтезованою апаратурою, або SAR.

SAR – це різновид активного збирання даних, коли датчик сам виробляє енергію, а потім фіксує кількість цієї енергії, відбитої назад після взаємодії із Землею [9].

У той час, як оптичні зображення схожі на інтерпретацію фотографії, дані SAR вимагають іншого підходу, оскільки сигнал реагує на властивості поверхні, як-от структуру і вологість. Геометрія спостережень, застосована для формування синтетичної апертури для цілі P в позиції вздовж треку $x = 0$ зображена на рис. 1.1.

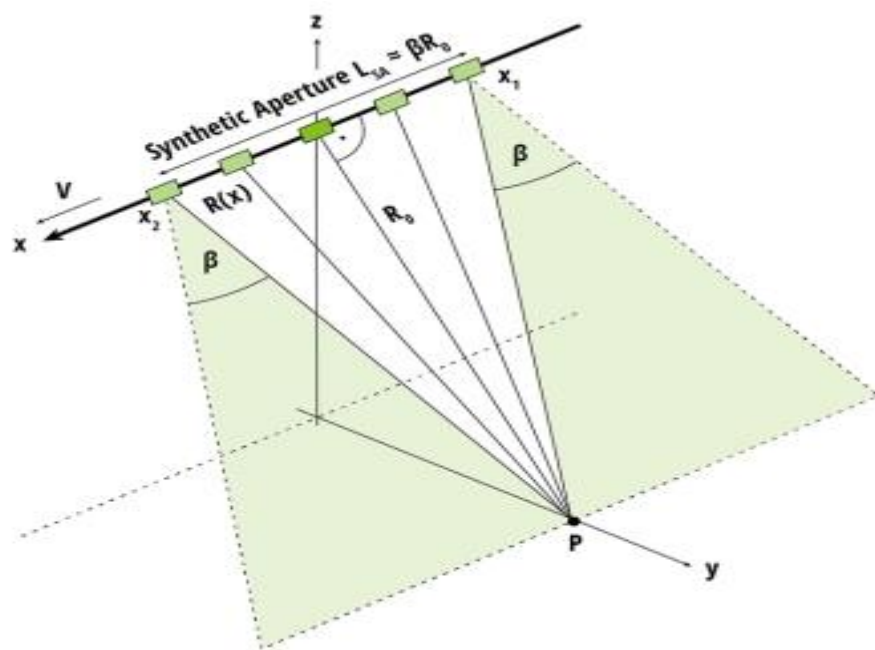


Рисунок 1.1. – Геометрія спостережень при застосуванні SAR.

Системи SAR (Synthetic Aperture Radar) використовують активне мікрохвильове зондування, що дозволяє збирати дані про земну поверхню незалежно від погодних умов та часу доби. Поляриметрія в SAR ґрунтується на вивченні взаємодії електромагнітних хвиль з об'єктами, здатними змінювати поляризацію відбитого сигналу [1].

Електромагнітна (ЕМ) плоска хвиля містить часові компоненти електричного та магнітного полів у площині, ортогональній до напрямку руху. Зазвичай, коли ЕМ-хвиля випромінюється джерелом, як-от антена радара, вона розповсюджується у всіх доступних напрямках з певним напруженням поля та фазою в кожному. На великій відстані від антени можна припустити, що хвильовий фронт плоский, а не сферичний.

Поляризація є ключовою характеристикою плоскої електромагнітної хвилі. Вона стосується орієнтації та упорядкованості компонент електричного та магнітного полів хвилі у площині, перпендикулярній до напрямку розповсюдження. Дані SAR можуть збирати сигнали з різними поляризаціями, контролюючи їх під час передачі та прийому.

Просторова роздільна здатність радіолокаційних даних прямо залежить від відношення довжини хвилі датчика до довжини антени. За фіксованої довжини хвилі, довша антена забезпечує кращу просторову роздільну здатність. Для супутника на орбіті, що працює на довжині хвилі близько 5 см (радар С-діапазону), для досягнення просторової роздільної здатності 10 м потрібна радарна антена довжиною близько 4250 м. На рис. 1.2 зображено електромагнітний спектр із вставкою мікрохвильових діапазонів.

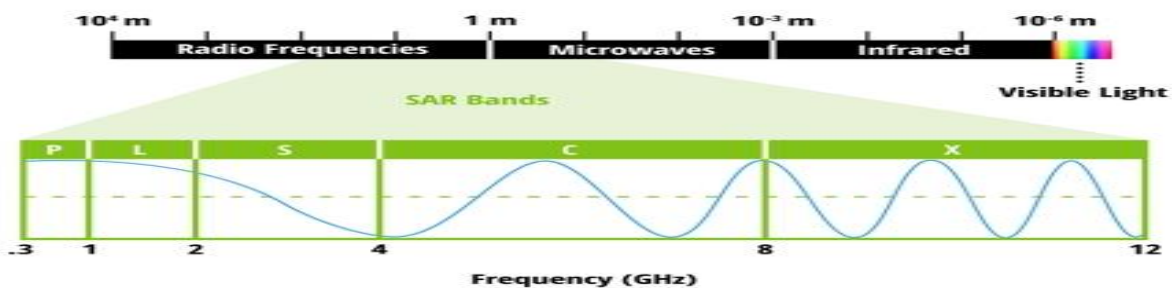


Рисунок 1.2. – Електромагнітний спектр із вставкою мікрохвильових діапазонів.

Антену таких розмірів не практично для космічного супутникового сенсора. Тому, науковці й інженери вигадали геніальний вихід – синтетичну апаратуру. Ця концепція передбачає поєднання серії знімків з меншої антени, що імітує набагато більшу антену, даючи змогу отримувати дані з вищою роздільною здатністю [8].

Оптичні сенсори такі, як оперативний супутник Landsat і мультиспектральний Sentinel-2, збирають дані у видимій, ближній інфрачервоній і короткохвильовій інфрачервоній частинах електромагнітного спектра. Радіолокаційні сенсори використовують довші хвилі в сантиметровому та метровому діапазоні, що наділяє їх особливими властивостями, як-от здатність бачити крізь хмари. Різні довжини хвиль SAR часто позначають діапазонами літерами, такими як X, C, L і P.

Довжина хвилі є важливою характеристикою для роботи із SAR, оскільки вона визначає взаємодію радіолокаційного сигналу з поверхнею та глибину його проникнення в середовище. Наприклад, радар X-діапазону, який працює на хвилі близько 3 см, майже не здатний проникати крізь широколистяний ліс, тож взаємодіє переважно з листям у верхній частині крон дерев. Натомість сигнал L-діапазону, з довжиною хвилі близько 23 см, забезпечує більше проникнення в ліс, забезпечуючи взаємодію між радіолокаційним сигналом і великими гілками та стовбурами дерев. Довжина хвилі впливає не тільки на глибину проникнення в ліс, але й на інші типи земного покриття такі, як ґрунт.

Радар також може збирати сигнали в різних поляризаціях, контролюючи аналізовану поляризацію, як при передачі, так і в прийомі. Поляризація стосується орієнтації площини, в якій коливається електромагнітна хвиля, що передається. Хоча, орієнтація може бути під будь-яким кутом, датчики SAR зазвичай передають лінійно поляризовані. Горизонтальну поляризацію позначають літерою H, а вертикальну – V [20].

Перевага радіолокаційних сенсорів полягає в тому, що поляризацію сигналу можна точно контролювати, як при передачі, так і при прийомі. Сигнали, випромінені у вертикальній (V) та прийняті в горизонтальній (H) поляризації, позначатимуться символом VH. Або ж сигнал, що був випромінений в горизонтальній (H) та прийнятий в горизонтальній (H) поляризації, позначатиметься HH, і так далі. Вивчення рівня сигналу з цих різних поляризацій несе інформацію про структуру зображеної поверхні, яка базується на наступних типах розсіювання: шорстка поверхня, об'ємне і подвійне розсіювання (рис. 1.3).

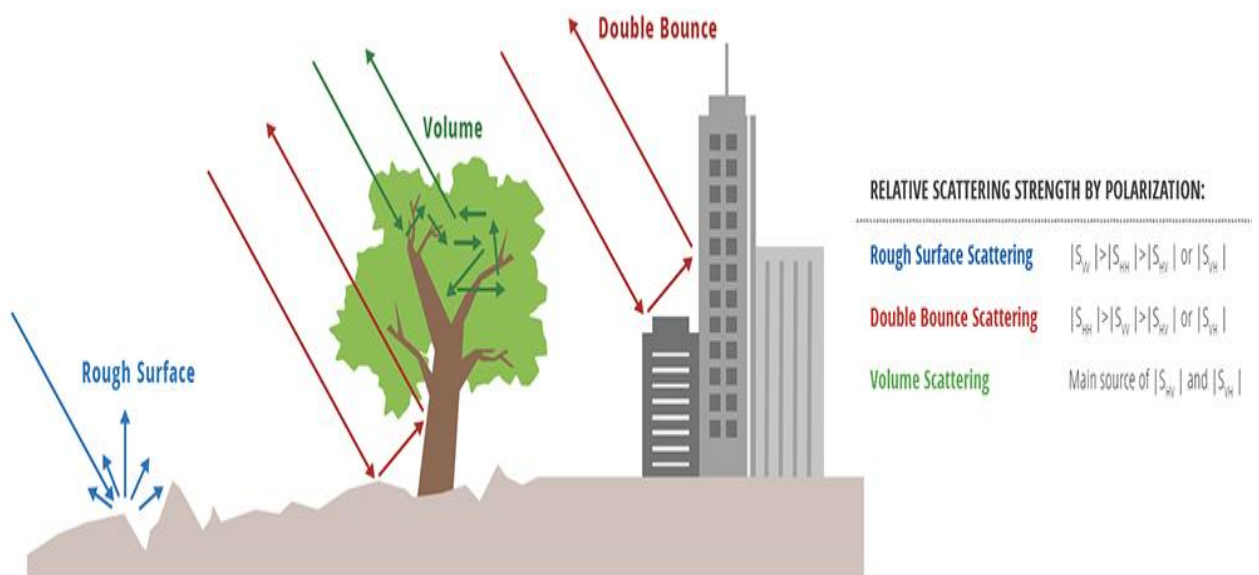


Рисунок 1.3. – Типи радарного розсіювання (SAR).

Шорстка поверхня (Rough Surface Scattering) – це розсіювання від природної шорсткої поверхні, наприклад ґрунту або кам'янистої місцевості.

Основне розсіювання в напрямках, близьких до зворотного, властиве слабке поляризаційне відображення та відносна сила розсіювання:

Об'ємне розсіювання (Volume Scattering) виникає у середовищі з великою кількістю елементів, що розсіюють сигнал у різних напрямках (наприклад, листя, гілки, ліс), характеризується випадковими напрямками розсіювання.

Подвійне розсіювання (Double Bounce Scattering) виникає при одночасному відбитті сигналу між вертикальними та горизонтальними поверхнями (наприклад, будівлі + земля). Найбільш характерне для урбанізованих територій.

Розсіювання від шорсткої поверхні, наприклад, від голого ґрунту чи води, є найбільш чутливим до розсіювання VV. Об'ємне розсіювання, спричинене листям і гілками в лісовій кроні, є найбільш чутливим до перехресно-поляризованих даних, таких як VH або HV. Останній тип розсіювання, подвійне відбиття, спричинений будівлями, стовбурами дерев, або затопленою рослинністю, є найбільш чутливим до HH-поляризованого сигналу.

Висока розсіяність в HH свідчить про домінування розсіювання з двократним відбиттям (скажімо, стебла рослин, штучні об'єкти). З іншого боку, помітне VV пов'язується з розсіюванням на шерехатих поверхнях (як-от оголена земля, вода). Просторові зміни у подвійній поляризації вказують на присутність об'ємних розсіювачів, наприклад, рослинність, або добре проникні типи ґрунту, такі, як пісок чи інші сухі, пористі ґрунти [19].

Варто звернути увагу, що інтенсивність сигналу, спричинена різними типами розсіювання, може коливатися в залежності від довжини хвилі, адже довжина хвилі впливає на глибину проникнення сигналу. Наприклад, сигнал С-діапазону проникає лише у верхні шари лісового покриву, через що зазнає переважно поверхневого розсіювання, змішаного з обмеженою кількістю об'ємного. Втім, сигнал L-діапазону, або Р-діапазону проникає набагато

глибше, тож відчуває сильне об'ємне розсіювання, а також збільшується кількість подвійного розсіювання, зумовленого стовбурами дерев (рис. 1.4).

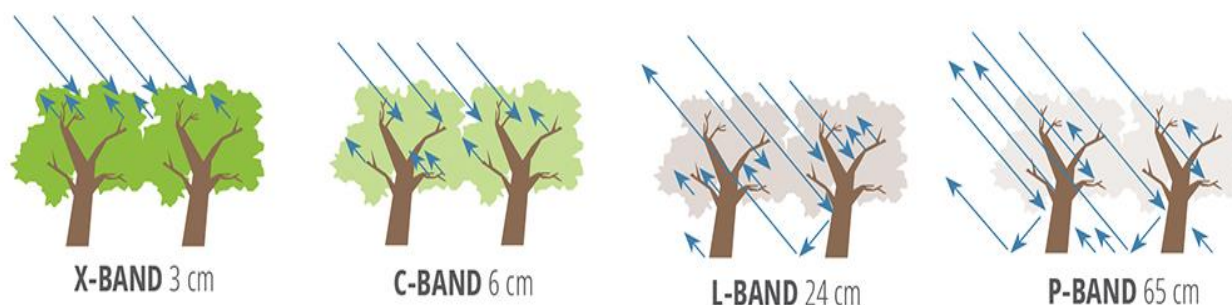


Рисунок 1.4. – Зображення проникнення радарного сигналу в залежності від довжини хвилі (діапазону SAR).

Рис. 1.4 демонструє, як різні діапазони SAR (X, C, L, P) з різною довжиною хвилі проникають крізь рослинність, зокрема X-діапазон (3 см) відбивається переважно від крони дерев, С-діапазон (6 см) частково проникає крізь листя, L-діапазон (24 см) проникає до стовбура, Р-діапазон (65 см) проникає крізь усе дерево, включаючи стовбур. Залежність показників радіолокаційного дослідження від структури лісового покриву та глибини проникнення радіохвиль крізь крони дерев на різних частотах, використовують для дистанційного зондування Землі [3].

1.3. Обробка та аналіз даних SAR

Важливо, що з 2014 року стали доступними та безкоштовними цілі набори даних SAR, починаючи з моменту запуску та впровадження політики відкритих даних Європейського космічного агентства з супутника Sentinel-1. Інші датчики мають або архівні знімки, доступні вибірково для певних територій, або ж політику, що передбачає платне придбання даних.

Одним з недоліків роботи з даними SAR є певні складні етапи попередньої обробки, потрібні для обробки даних SAR нижчого рівня. Залежно від виду аналізу ці кроки попередньої обробки можуть містити:

застосування файлу орбіти, радіометричне калібрування, об'єднання, багатозональний перегляд, спекл-фільтрацію та корекцію рельєфу.

Етапи обробки даних SAR включають:

1. налаштування даних орбіти – встановлюється взаємозв'язок між координатами Землі та отриманими даними, підвищуючи точність наступних етапів обробки;

2. радіометричне калібрування – перетворення значень пікселів зображення з цифрового числа (DN) у стандартну геофізичну одиницю вимірювання зворотного радіолокаційного розсіювання;

3. об'єднання фрагментів – сцени SAR можуть складатися з кількох смуг, або частин. На цьому кроці всі смуги об'єднуються в єдине зображення;

4. усереднення – застосування просторового усереднення для зменшення спекл-шуму зображення та перетворення його на растр місцевості зі стандартним розміром пікселів, а також зменшення роздільної здатності зображення (за необхідності).

5. спекл-фільтрація – усунення шуму, або спеклу із зображення. Доступні різні типи спекл-фільтрів, і для різних застосувань є певні фільтри, які найкраще підходять. На відміну від багатозонального перегляду, цей крок не зменшує просторової роздільної здатності;

6. корекція рельєфу передбачає радіометричне вирівнювання місцевості (RTF) та геокодування RTF – використовується матриця висот для видалення радіометричних спотворень, що залежать від геометрії, що нормалізує виміряне зворотне розсіювання по відношенню до нахилу місцевості. При геокодуванні використовується матриця висот для усунення геометричних спотворень, таких як ракурс, накладення та тіні, що прив'язує зображення до географічної системи координат;

7. конвертація – оінійно масштабовані дані перетворюються на децибели (дБ) за потреби [2].

Для аналітичної обробки SAR-даних використовують:

- коваріаційні матриці (C2, C3, C4), що описують статистику другого порядку поляриметричних компонентів;
- когерентні матриці (T3, T4), що зберігають фазову інформацію і дозволяють фізично інтерпретувати типи розсіювання.

На основі цих матриць виконують:

1. спекл-фільтрацію – для зменшення радарного шуму;
2. декомпозицію – для розділення механізмів розсіювання;
3. класифікацію – автоматичне групування схожих об'єктів.

Декомпозиція дозволяє виділити компоненти сигналу, що відповідають конкретним типам розсіювання. Найпоширенішими методами є:

- Freeman–Durden, що виділяє три механізми: поверхнєве, об'ємне, подвійне розсіювання;
- Yamaguchi – додатково враховує подвійне розсіювання.
- Pauli, Sinclair, H-A-Alpha, Touzi – використовують для інтерпретації поляриметричних властивостей сигналу залежно від конкретної задачі [19].

Ці методи дозволяють точно виділяти урбанізовані ділянки за інтенсивністю подвійного відскоку.

Для автоматичного розділення територій за типами поверхні застосовують неконтрольовану класифікацію (наприклад, H-Alpha Wishart), яка використовує значення ентропії та α -параметра для побудови кластерів без навчальних даних та контрольовану класифікацію, яка потребує вхідних еталонних даних. Ці методи дозволяють виявляти та картографувати урбанізовані райони без додаткових польових спостережень.

Компактна поляриметрія (Compact Polarimetry, CP) – це спрощена схема поляризації, що використовує кругову передачу та подвійні поляризації. Хоча вона не забезпечує повну матрицю, її можна симулювати з повно поляриметричних даних. Оцінка параметрів Стокса в CP дозволяє описати ступінь поляризації та типи розсіювання без втрати суттєвої аналітичної інформації.

Зрозуміло, що поляризація SAR є потужним інструментом аналізу урбанізованих територій. Вона забезпечує детальну ідентифікацію забудованих ділянок, оцінку типів поверхонь та конструкцій, побудову кількісних моделей для щільності забудови, а також можливість інтеграції з ГІС для подальшого аналізу. Її застосування дозволяє вдосконалити процеси містобудівного планування, моніторингу змін територій та оцінки впливу урбанізації на довкілля [2].

Поляризація – це орієнтація площини переданого радіолокаційного сигналу, найчастіше використовується горизонтальна (H) і вертикальна (V) поляризація. Орієнтація переданого радіолокаційного сигналу може змінюватися через взаємодію з різними елементами на місцевості, такими як рослинність, вода, ґрунт тощо.

Отже, здатність SAR-датчика вимірювати цю зміну поляризації може бути корисною під час аналізу типів земного покриття, дослідження лісових масивів, сільськогосподарських угідь, тощо. Позначаючи поляризації передачі та прийому парою символів, радарна система, що використовує лінійні поляризації H та V, може мати такі канали:

HH – для горизонтальної передачі та горизонтального прийому;

VV – для вертикальної передачі та вертикального прийому;)

HV – для горизонтальної передачі і вертикального прийому;

VH – для вертикальної передачі та горизонтального прийому.

Перші дві з цих комбінацій поляризації називають одно поляризованими, оскільки поляризації передачі та прийому однакові. Останні дві комбінації називають крос-поляризованими, оскільки поляризації передачі та прийому ортогональні одна одній [4].

Радарна система може мати різні рівні складності поляризації:

1. одно поляризовані – HH, або VV, або HV, або VH;
2. подвійна поляризація – HH і HV, VV і VH, або HH і VV;
3. чотири поляризації – HH, VV, HV і VH.

Поляриметричний радар використовує ці чотири поляризації та вимірює різницю фаз між каналами, а також їхні величини. Деякі радары з подвійною поляризацією також вимірюють різницю фаз між каналами, оскільки ця фаза відіграє важливу роль у вилученні поляриметричної інформації. Такі датчики, як Sentinel-1, можуть надсилати сигнали лише в одній поляризації, або H, або V, і здатні приймати сигнали в обох напрямках, забезпечуючи таким чином подвійну поляризацію зображень у VV (вертикальна передача та вертикальний прийом) і VH (вертикальна передача та горизонтальний прийом), або HH і HV.

Інші супутники SAR такі, як TerraSAR-X, або ALOS-PALSAR, можуть надсилати дані в обох поляризаціях і приймати їх в обох напрямках, надаючи таким чином чотири полярні дані у форматах HH, VV, HV і VH.

Використовуючи комплексні методи декомпозиції, застосовуючи техніку, відому як поляриметрія SAR, можливо отримати дані про характеристики забудови, види дерев, типи ґрунтів, стан сільськогосподарських культур та інші аспекти досліджуваної території [12].

У сфері міського аналізу, поляриметрія SAR особливо ефективна для ідентифікації густо забудованих ділянок, адже характерне подвійне відбиття (double-bounce scattering) між вертикальними та горизонтальними поверхнями (наприклад, стіною будівлі та землею) створює чітку сигнатуру на радіолокаційному зображенні. Це дає змогу відрізнити урбанізовані зони від природних таких, як ліси, або сільськогосподарські угіддя, де переважає об'ємне чи поверхнєве розсіювання.

За допомогою моделей декомпозиції, наприклад, Freeman-Durden, Yamaguchi, Touzi та класифікації типів розсіювання, можна проводити просторове зонування міста, оцінювати щільність забудови, виявляти не законне або не зареєстроване будівництво, а також слідкувати за динамікою урбанізації з часом. Інтеграція цих даних у геоінформаційні системи (ГІС) надає потужний інструмент для містобудівного планування, управління та моніторингу земельних ресурсів [15].

2. АНАЛІЗ ЗАБУДОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ МІСТА ЛЬВОВА

2.1. Функціонально-планувальна структура міста Львова

Місто Львів – це один з найбільших історичних, культурних та економічних осередків України. За офіційними даними, площа міста сягає понад 180 км², а кількість населення перевищує 700 тис. осіб. Урбанізована структура Львова поєднує в собі компактну історичну частину із середньою густотою забудови та розгалужену периферійну мережу житлових, промислових і транспортних об'єктів.

Характерною рисою забудови Львова є велика кількість історичних кварталів з кам'яною архітектурою, що здебільшого походять з часів Австро-Угорщини, міжвоєнного періоду та радянської епохи, а також активне житлове будівництво у ХХІ столітті на околицях міста. Таким чином, місто характеризується складною структурою просторового розвитку, що вимагає сучасних методів аналізу, зокрема із використанням супутникових даних.

Вивчення формування та еволюції забудови історичних міст, зокрема таких, як Львів, представляє інтерес і є важливим як з наукової, так і з практичної точки зору. Це обумовлено насамперед необхідністю збереження історичної спадщини, а також потребою впровадження сучасних практик будівництва та міського планування [11].

Згідно з Генеральним планом Львова (рис. 2.1), затвердженим у 2010 році, який лишається актуальним на 2025 рік, міська територія розподілена за функціональним призначенням.

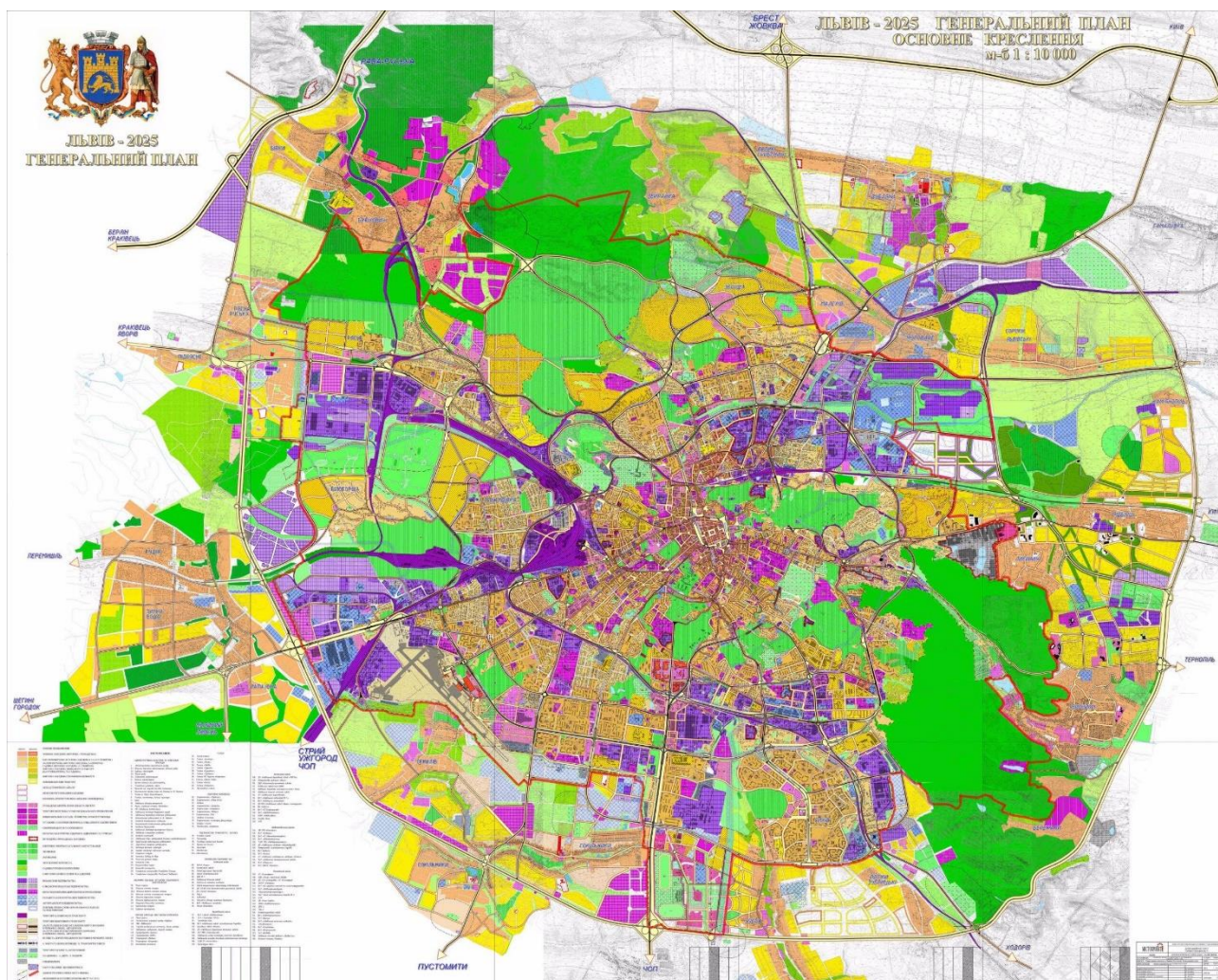


Рисунок 2.1. – Генеральний план Львова.

Житлова забудова займає понад 43 % загальної площі. Громадсько-ділові зони покривають близько 12 % території. Промислові, комунально-складські зони – близько 9 %. Рекреаційні та озеленені площі – понад 18 %. Землі транспорту та інфраструктури становлять – понад 10 % (рис. 2.2) [24].

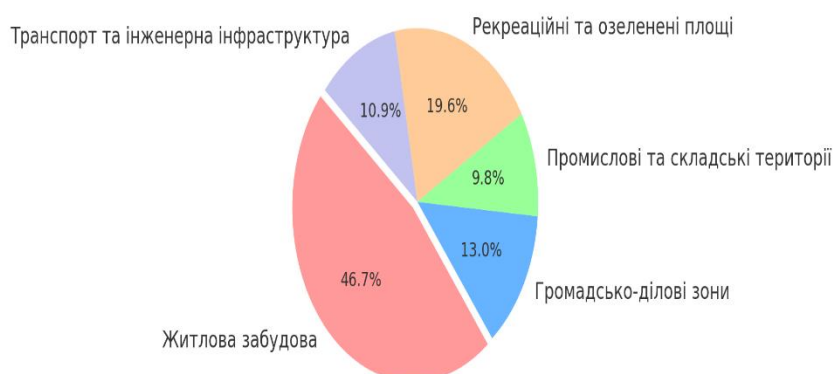


Рисунок 2.2. – Розподіл функціональних зон міста Львова.

Такий розподіл сприяє формуванню переважно змішаного міського середовища, де домінують житлові та громадські функції. У Львові, в адміністративних межах, найщільніше забудовані Галицький, Франківський та частина Шевченківського районів.

Статистика Головного управління статистики у Львівській області за 2023 рік свідчить про щільність населення у Львові приблизно 3800 осіб/км², що суттєво перевищує середній показник по Україні, який становить менше 100 осіб/км². Найбільша щільність зафіксована в центрі та прилеглих районах, що зумовлено компактною багатоповерховою забудовою [7].

Аналіз відкритих даних детальних планів територій (ДПТ) та кадастрових карт дає змогу виділити основні типи забудови:

- історична щільна кам'яна забудова (XVI–XIX ст.) – центр міста, Галицький район;
- радянська панельна забудова (5-9 поверхів) – Сихівський, Личаківський, Шевченківський райони;
- новобудови 2000-х років (8-16 поверхів) – периферійні території (Левандівка, Рясне, Знесіння).
- садибна приватна забудова – околиці Білогірці, Винник, Брюхович.

Це дозволяє говорити про різноманітність структури забудови, характерну для міст пострадянського періоду.

Упродовж останніх десяти років у Львові спостерігається помітне прискорення будівництва житла. Офіційна статистика показує, що у 2015-2023 роках щороку вводилося в експлуатацію понад 250-300 тис. м² житлових площ, переважно у багатоповерхових будинках. Це веде до ущільнення існуючої забудови, перетворення промислових зон на житлові квартали, розширення меж садибної забудови на північному сході та південному заході міста [11].

У межах міста ще є потенційні території для забудови – це колишні промислові зони (район Персенківки, Рясного), а також території, що

увійшли до складу громади після останнього об'єднання.

Серед ключових проблем сучасного розвитку забудови у Львові варто виділити:

- дефіцит вільних ділянок у центральній частині міста;
- перевантаження транспортної інфраструктури в зонах щільної забудови;
- не систематичну зміну функціонального призначення земельних ділянок;
- тиск урбанізації на природоохоронні території, наприклад, Снопківський парк, чи Знесіння.

З метою вирішення цих проблем міська рада розробляє нові детальні плани територій, а також оновлює Генеральний план, зосереджуючись на комплексному управлінні простором. Місто Львів має складну структуру забудови, поєднуючи історичні, радянські та сучасні етапи формування міського простору. Найщільнішою забудовою характеризуються центральні райони, тоді як на периферії активно зводяться багатоповерхові житлові комплекси. У міському плануванні все більше значення надається балансу між інфраструктурною щільністю, якістю середовища проживання та збереженням зелених зон [6].

2.2. SAR-поляриметрія як інструмент аналізу міської забудови Львова

Динаміку та ключові тенденції розвитку урбанізованих зон територій найкраще з'ясовувати через визначення забудованих ділянок (територій під містами та селищами). Саме аналіз цих територій у різні відрізки часу, впродовж досить тривалого періоду дасть змогу виявити напрямки територіального розвитку урбанізованих регіонів, сучасні зони щільної забудови та їхні межі.

Широкі можливості для вирішення цього завдання відкривають дані

дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), як джерела інформації про земну поверхню, зокрема про зміни забудови населених пунктів. Дані ДЗЗ, на відміну від статистичних відомостей, містять інформацію про фактичний стан розвитку фізичних меж населених пунктів у чітко визначений момент часу. Дані ДЗЗ є оперативними, об'єктивними та незалежними, вони надають інформацію на великі за площею території, охоплюють значний проміжок часу (від 70-х років ХХ ст. до сьогодні) і дозволяють проводити дослідження, не взаємодіючи безпосередньо з досліджуваною територією. За допомогою ГІС-технологій є можливість обробки даних ДДЗ та створення картосхем [1].

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) – це спосіб отримання відомостей про стан об'єктів земної поверхні через аналіз вимірів, здійснених з віддалі, тобто без фізичного дотику до об'єкта. Це відбувається завдяки реєстрації електромагнітного випромінювання, яке віддзеркалюється, поглинається, або розсіюється об'єктами на поверхні.

Поширення електромагнітного випромінювання відбувається за допомогою електромагнітних хвиль. Прикладами таких хвиль є світло, радіохвилі, рентгенівські промені та гамма-промені. Електромагнітна хвиля характеризується частотою та хвильовим вектором k , що визначає напрямок її розповсюдження, а також довжиною. В залежності від частоти або довжини хвилі (ці величини є взаємо залежними), електромагнітні хвилі належать до конкретного спектрального діапазону.

Електромагнітні хвилі з найменшою частотою, або найбільшою довжиною відносяться до радіодіапазону. Останній застосовується для передачі сигналів на відстань за допомогою радіо, телебачення та мобільних телефонів. В радіодіапазоні працює радіолокація. Радіодіапазон ділиться на метровий, дециметровий, сантиметровий та міліметровий, в залежності від довжини електромагнітної хвилі [10].

Дані дистанційного зондування Землі ефективно використовуються для аналізу просторового розвитку урбанізованих територій, зокрема, при дослідженні динаміки забудови населених пунктів. Встановлено, що

оптимальними джерелами даних ДЗЗ для визначення площі забудованих територій є мульти спектральні космічні знімки. На основі дешифрування та аналізу знімків можна дослідити земний покрив (рослинність, водойми, території під населеними пунктами), зокрема, забудовані території, та проаналізувати зміни динаміки урбанізованих площ у різні часові проміжки.

Методика поляриметричного радіолокаційного зондування (SAR-поляриметрія) – це один з найінформативніших методів дистанційного зондування Землі, що ґрунтується на аналізі відгуків електромагнітного сигналу в різних поляризаційних станах. Поляриметричні SAR-системи фіксують дані у чотирьох поляризаційних комбінаціях HH, HV, VH, VV, що дозволяє відтворити повну характеристику електромагнітного розсіювання об'єктів на земній поверхні [4].

Характерною рисою SAR-поляриметрії є її здатність визначати фізичні властивості об'єктів такі, як структура, орієнтація, вологість, геометрична форма, а також тип взаємодії сигналу з поверхнею, наприклад, відбиття від гладкої поверхні, подвійне розсіювання між вертикальною і горизонтальною площинами, або об'ємне розсіювання для рослинності.

У порівнянні з оптичними даними, радіолокаційні знімки мають низку суттєвих переваг:

1. не залежать від погодних умов та освітлення;
2. гарантують надійну фіксацію структури поверхні навіть за хмарності, вночі або в умовах диму, або запиленості;
3. дозволяють оцінювати внутрішню структуру об'єктів за рахунок проникнення радарного сигналу, особливо в довгих діапазонах L та P.

Поляриметричні дані широко використовуються в геоінформаційних дослідженнях, зокрема для:

- картографування типів земного покриття;
- моніторингу стану сільськогосподарських угідь;
- оцінки стану лісів;
- виявлення змін у зоні забудови;

- класифікації типів міського середовища.

У контексті міських територій, SAR-поляриметрія дозволяє ідентифікувати наявність та щільність забудови, розрізняючи будівлі, дороги, відкриті ділянки та зелені зони. Подвійне розсіювання, притаманне вертикальним архітектурним конструкціям, створює специфічний сигнатурний відгук, який може бути виявлений, розділений та проаналізований за допомогою декомпозиційних методів, наприклад, Freeman-Durden, Pauli, Yamaguchi та класифікаційних алгоритмів.

В кваліфікаційній роботі реалізовано застосування методики повної SAR-поляриметрії на основі знімків ALOS PALSAR-1 у програмному середовищі SNAP, з метою виявлення та аналізу структури міської забудови м. Львова. Такий підхід дає змогу інтегрувати супутникові дані в сучасні містобудівні дослідження, покращуючи точність просторового аналізу й ефективність управління територіями [3].

Методика SAR-поляриметрії активно використовується в Європі та Північній Америці для аналізу міського середовища. Львів, як місто з різномірною типологією забудови, маючи історичний центр, радянські масиви та новобудови, є ідеальним об'єктом для дослідження такої методики.

2.3. Формування вхідних даних: вибір і отримання радарного знімка для аналізу забудованих територій міста Львова

Попри активне застосування SAR-технологій у світовому досвіді для вивчення забудованих територій, на прикладі міста Львова комплексна методика SAR-поляриметрії ще не була систематично впроваджена. У рамках цього дослідження здійснено одну з перших спроб застосування комплексного оброблення поляриметричних даних (ALOS PALSAR-1) з формуванням когерентних матриць, фільтрацією, декомпозицією та класифікацією забудови з використанням програмного забезпечення SNAP.

З цією метою необхідно завантажити знімок ALOS PALSAR з веб-

ресурсу NASA – ASF Data Search. Далі визначити ділянку навколо Львова на мапі, натискаючи лівою кнопкою миші та розтягуючи прямокутник (рис. 2.3). Для завершення визначення зони інтересу, натиснути ліву кнопку миші ще раз [25].

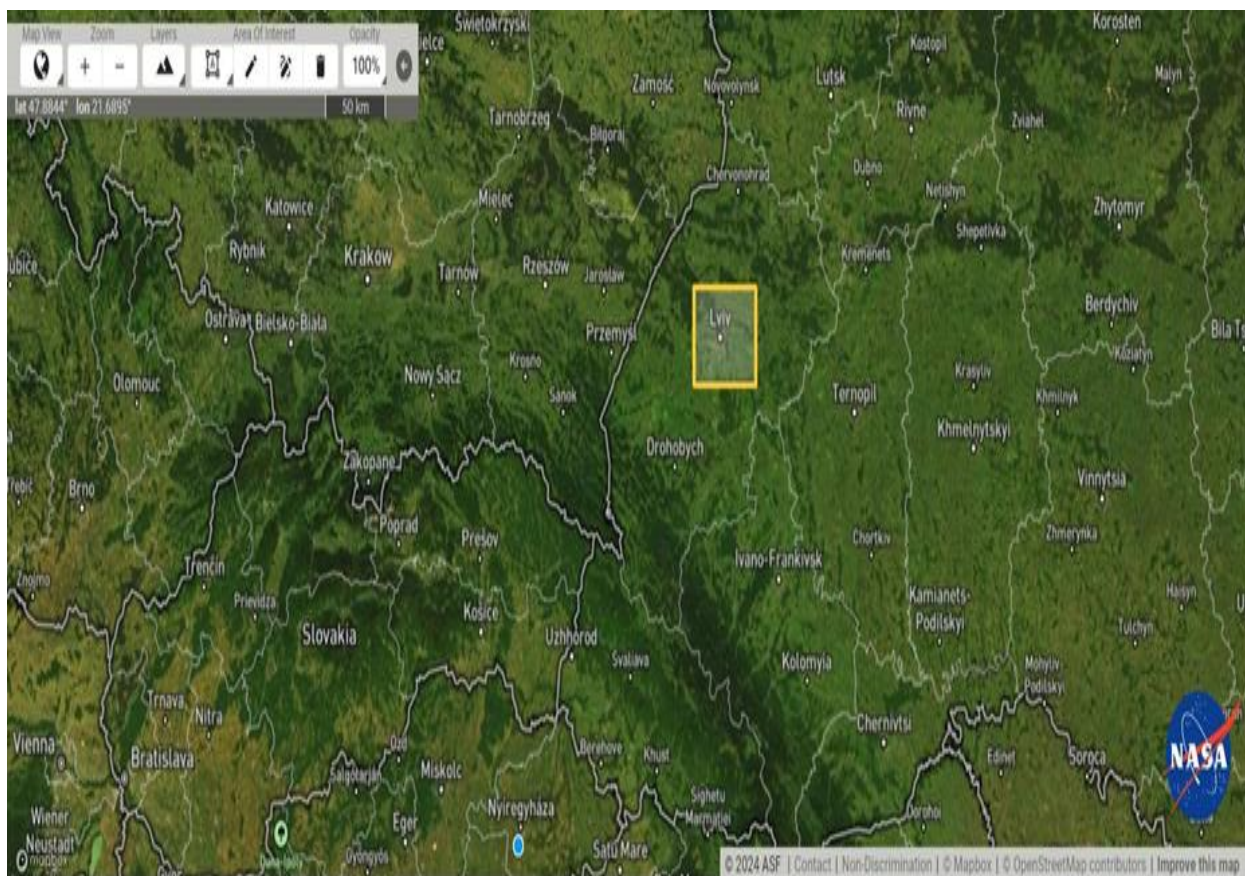


Рисунок 2.3. – Окреслення зони інтересу для завантаження знімку досліджуваної території міста Львова.

Далі, щоб знайти потрібне зображення, клінемо на Filters (Фільтри) та налаштуємо параметри пошуку. У вікні Search Filters для відшукування та завантаження зображення, необхідного для проведення дослідження, у розділі Additional Filters (Додаткові фільтри) в полі File Type (Тип файлу) оберемо Level 1.1 Complex, а в полі Polarization (Поляризація) – quadratic (квадратична). Натискаємо ліву клавішу миші, щоб приховати вікна з типами файлів, та клікаємо на Search (Пошук). В результаті пошуку з'явиться перелік супутникових знімків, що відповідають вказаним параметрам, та вибираємо потрібне лівою кнопкою миші (рис. 2.4).



Рисунок 2.4. – Результати пошуку і вибір потрібного знімка для досліджуваної території міста Львова.

Після визначення відповідного зображення натискаємо кнопку Завантажити, що відкриває вікно вибору формату файлу. Завантаження може вимагати авторизації через обліковий запис NASA Earthdata. У такому випадку потрібно ввести ім'я користувача та пароль, або зареєструватися на порталі. Підтвердивши завантаження, знімок буде збережено у форматі .zip у вказаному користувачем локальному каталозі.

Наступний крок – це розпакування архіву із супутниковими даними та його відкриття в середовищі ESA SNAP (Sentinel Application Platform). На цьому етапі відбувається початкова обробка: створюються когерентні матриці розсіювання для подальшого аналізу поляриметричних параметрів. За допомогою інструментів SNAP Toolbox проводять радіометричну корекцію, а потім фільтрацію з оптимальним розміром 5×5 , що допомагає зменшити спекл, зберігаючи просторову роздільність [19].

3. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ SAR-ПОЛЯРИМЕТРІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ ЛЬВОВА

3.1. Попередня обробка SAR-даних

З метою практичної реалізації методу SAR-поляриметрії для м. Львова на основі даних ALOS PALSAR-1 запускаємо програму SNAP. Відкриваємо завантажений знімок ALOS PALSAR, використовуючи послідовність дій: File (Файл) → Open Product (Відкрити продукт), вказуючи його місце знаходження на в комп'ютері.

У вікні Product Explorer (Провідник продукту) буде показано дані знімку ALOS PALSAR. Розгорнемо набір даних ALOS-P1_1 A-ORBIT ALPSRP201560990, клацнувши на стрілочку, а потім відкриємо зображення Intensity_HH, що знаходиться в папці Bands (Канали) так, як це зображено на рис. 3.1.

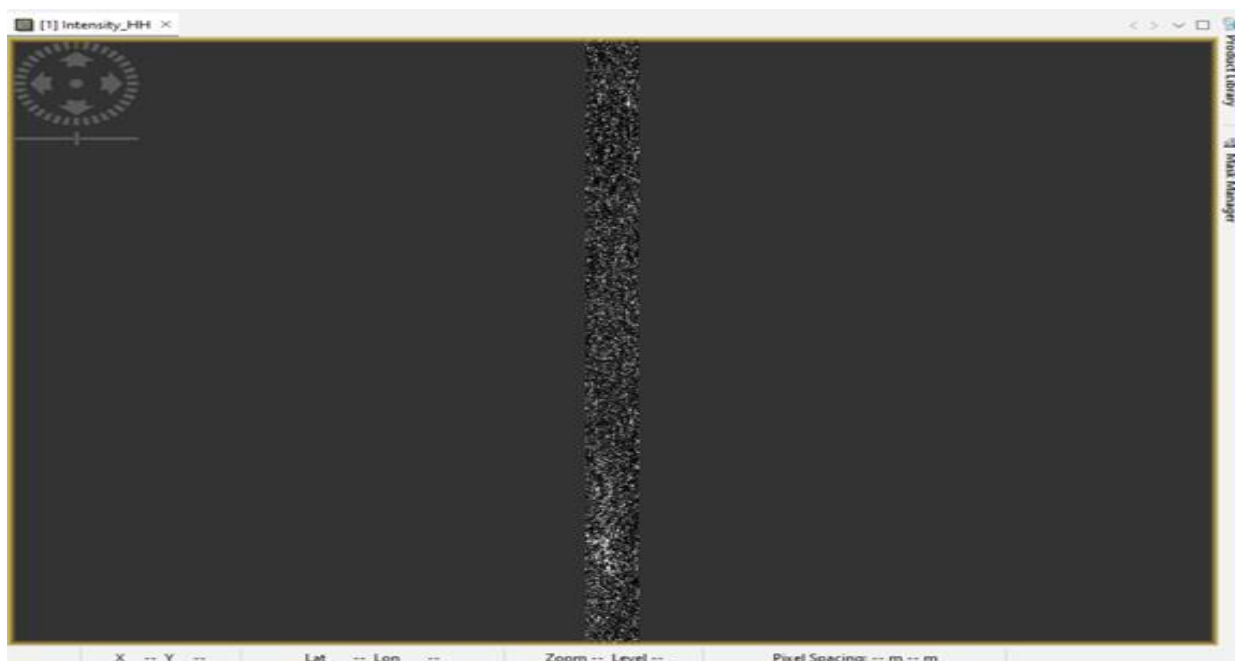


Рисунок 3.1. – Відображення каналу Intensity_HH у програмі SNAP.

Щоб правильно працювати з даними SAR, дані спочатку слід відкалібрувати. Калібрування радіометрично коригує зображення SAR таким

чином, щоб значення пікселів дійсно відображали радіолокаційне зворотне розсіювання відбиваючої поверхні. Для калібрування знімка потрібно виконати послідовність команд Radar → Radiometric → Calibrate.

Аби коректно працювати з даними SAR, першим ділом необхідно провести калібрування. Радіометричне калібрування коригує зображення SAR таким чином, що значення пікселів відображають дійсне радіолокаційне зворотне розсіювання від відбиваючої поверхні. Для калібрування знімку виконуємо послідовність дій: Radar → Radiometric → Calibrate. У вкладці Processing Parameters ставимо позначку в чекбоксі Save as complex output. Це необхідно, оскільки для поляриметричної обробки дані повинні бути комплексними [19].

Щоб перевести дані в нульову доплерівську геометрію, перш ніж застосовувати стандартну корекцію рельєфу SAR, слід використати функцію ALOS Deskewing. Вибираємо набір даних супутникового знімку, натиснувши лівою кнопкою миші на назву відкаліброваного у Product Explorer і застосовуємо послідовність команд Radar → Geometric → ALOS Deskewing. У вікні Processing Parameters як DEM обираємо SRTM 1Sec HGT (Auto Download) (SRTM 1Sec HGT), що передбачає автоматичне завантаження.

Далі слід виконати геокодування та корекцію рельєфу за допомогою команд Radar → Geometric → Terrain Correction → Range Doppler Terrain Correction. Інструмент Terrain Correction проводить геокодування зображення, виправляючи геометричні спотворення SAR за допомогою цифрової моделі рельєфу (DEM), і створює проєктований продукт на карті. Геокодування перетворює зображення з нахиленої, або наземної геометрії в систему координат карти. У якості джерела даних у вкладці I/O Parameters вибираємо створений на попередніх кроках продукт. У Processing Parameters в опції Source Bands відмічаємо всі канали, у DEM обираємо SRTM 1Sec HGT (Auto Download) (SRTM 1Sec HGT), що передбачає автоматичне завантаження та знімаємо позначку біля Mask out areas without elevation, поставивши позначку в чекбоксі Output complex data.

Переглядаємо результати проведеної корекції. Для цього розгортаємо набір даних, натиснувши на стрілочку та відкривши зображення Intensity_HH в папці Bands (рис. 3.2).

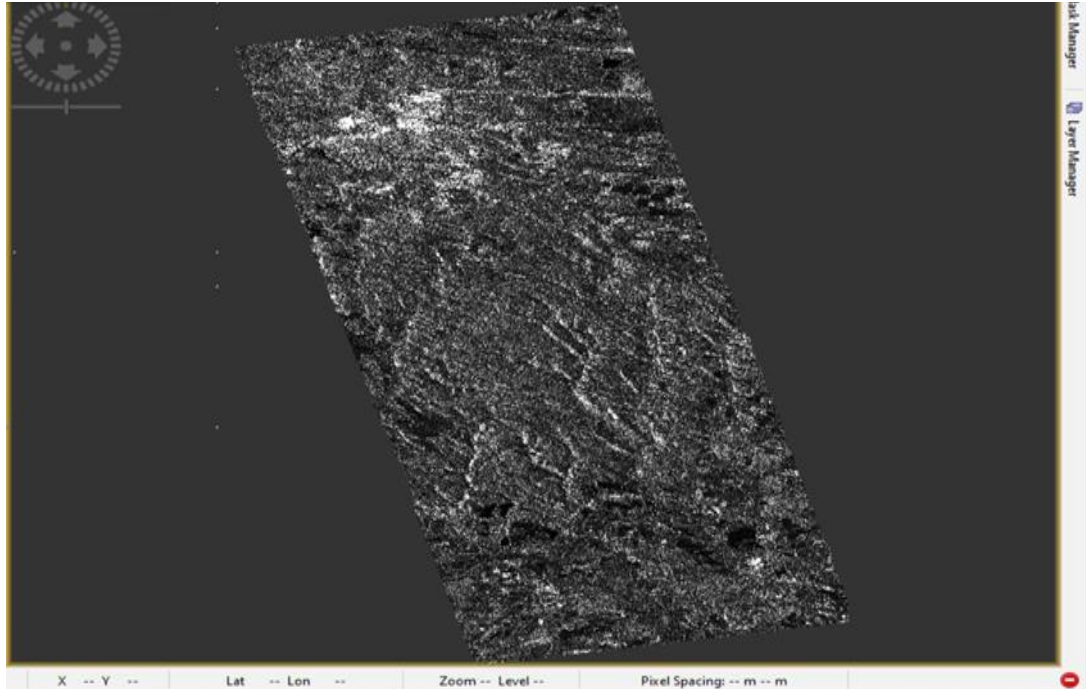


Рисунок 3.2 – Результати геокодування і корекції рельєфу у програмі SNAP.

Обрізку знімку відповідно до визначеної зони інтересу для скоригованого продукту здійснюємо за допомогою команди Raster → Subset. Далі зберігаємо остаточний продукт та закриваємо всі попередні (рис. 3.3).

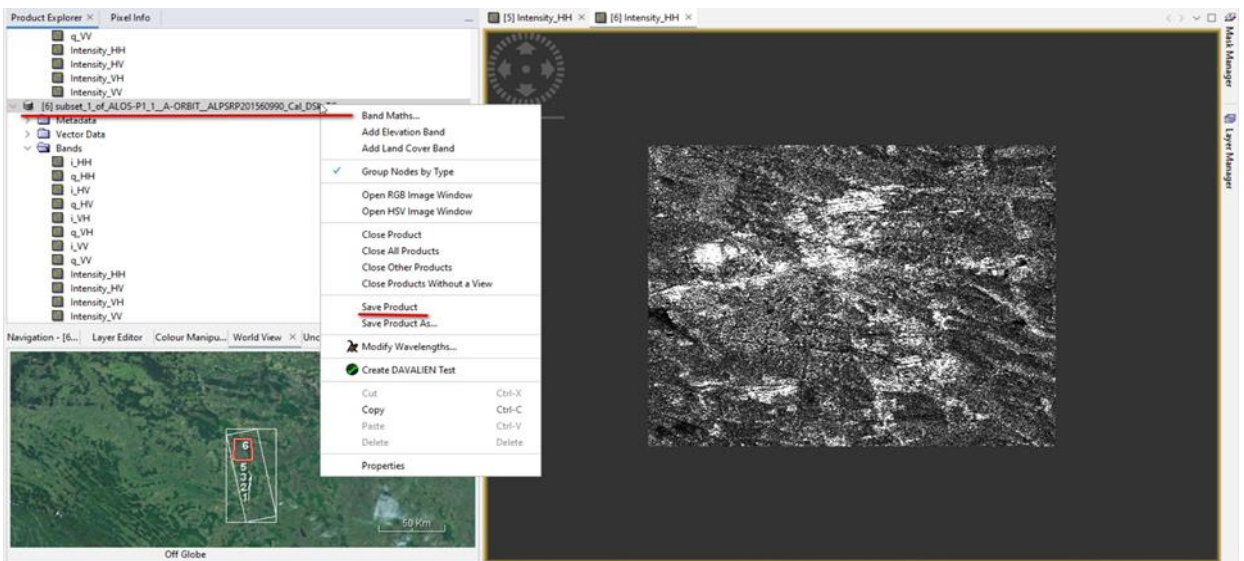


Рисунок 3.3 – Перегляд і збереження результату попередньої обробки даних у програмі SNAP.

Поляриметричні набори даних можливо конвертувати у різні матричні представлення, котрі містять реорганізовану форму інформації для подальшого аналізу. Усі поляриметричні інструменти використовують як вхідні дані матриці когерентності (T) чи коваріації (C), зокрема:

- коваріаційна матриця C2;
- коваріаційна матриця C3;
- коваріаційна матриця C4;
- матриця когерентності T3;
- матриця когерентності T4.

Для спрощення роботи користувачів, будь-який поляриметричний оператор також приймає калібровані продукти SLC, як вхідні дані. У цьому випадку вхідний квадратний добуток автоматично трансформується в матрицю T3. Саме матрицям когерентності T3 часто надається перевага, оскільки їх елементи дозволяють фізичну інтерпретацію, в тому числі не парне відбиття, парне відбиття, дифузне тощо, тоді як матриця коваріації C3 є не когерентним поляриметричним представленням, що стосується статистики другого порядку елементів матриці розсіювання. Для цього застосовують оператор Matrix Generation, коли необхідно чітко обрати, яку матрицю використовувати. Після генерації матриці, вихідні смуги (HH + HV + VH + VV) більше не присутні в продукті, оскільки їх замінено позначеннями матриці, наприклад, C11, C22 та C33 [19].

Щоб перетворити продукт в одну з матриць, використовують оператор Matrix Generation. Щоб згенерувати матрицю когерентності T3, виконують послідовність дій Radar → Polarimetric → Polarimetric Matrix Generation. У назві продукту, що генерується поле Target Product обов'язково має відображати T3 для легкого розпізнавання.

Щоб згенерувати матрицю коваріації C3, виконують Polarimetric → Polarimetric Matrix Generation. У назві продукту, що генерується поле Target Product обов'язково має відображати "C3" для зручної ідентифікації.

Для порівняння згенерованих матриць T3 і C3, послідовно виділяємо їхні

назви у Product Explorer та створюємо Window → Open RGB Image Window відповідні зображення RGB для кожної (рис. 3.4).

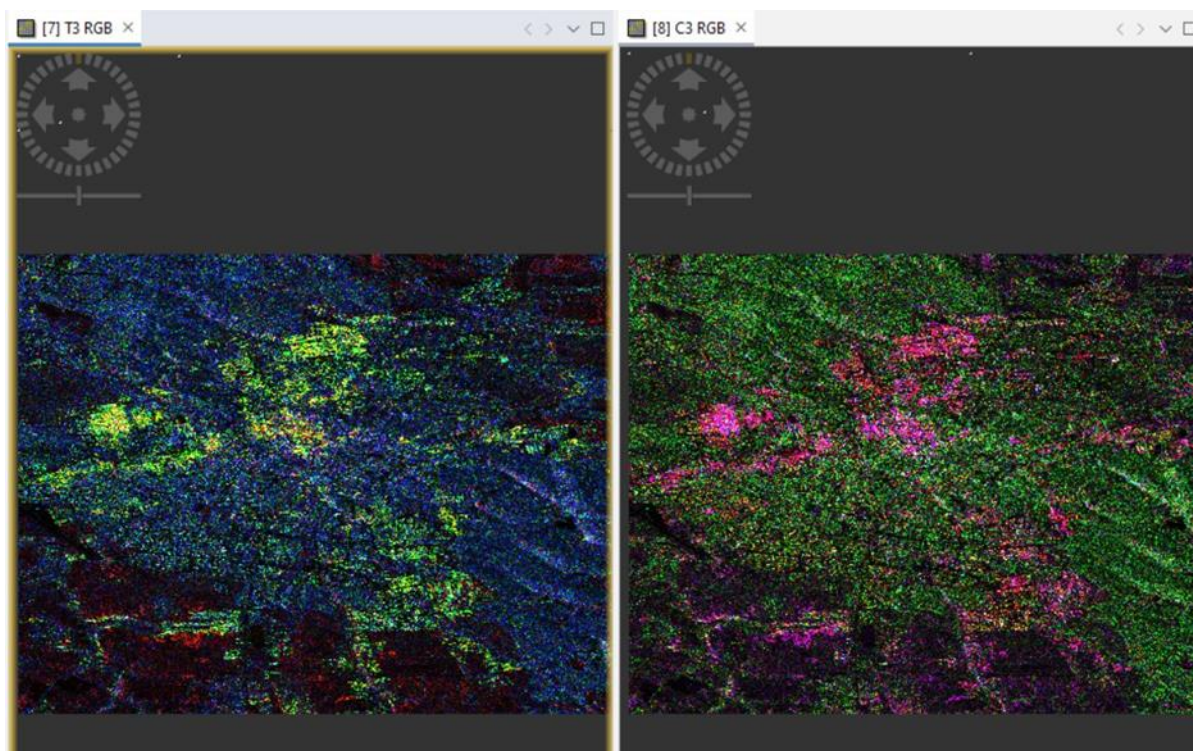


Рисунок 3.4 – Порівняння зображень матриць T3 і C3 у програмі SNAP.

Аби прибрати шуми, характерні для SAR-зображень, можна використати спекл-фільтр. У випадку з поляризованими комплексними зображеннями допустимо використовувати стандартні спекл-фільтри, доступні в розділі "Обробка SAR". Але для повноцінних поляриметричних даних передбачені поляриметричні спекл-фільтри, котрі використовують всі діапазони та зберігають комплексні дані.

Виконуємо наступні кроки: Radar → Polarimetric → Polarimetric Speckle Filter. Застосовуємо цей фільтр до продукту матриці когерентності T3 при цьому налаштування фільтра та його параметри не змінюємо. На рис. 3.5 представлено створено RGB-зображення з відфільтрованим продуктом та порівняння зображення матриці когерентності T3 до і після застосування спекл-фільтру [25].

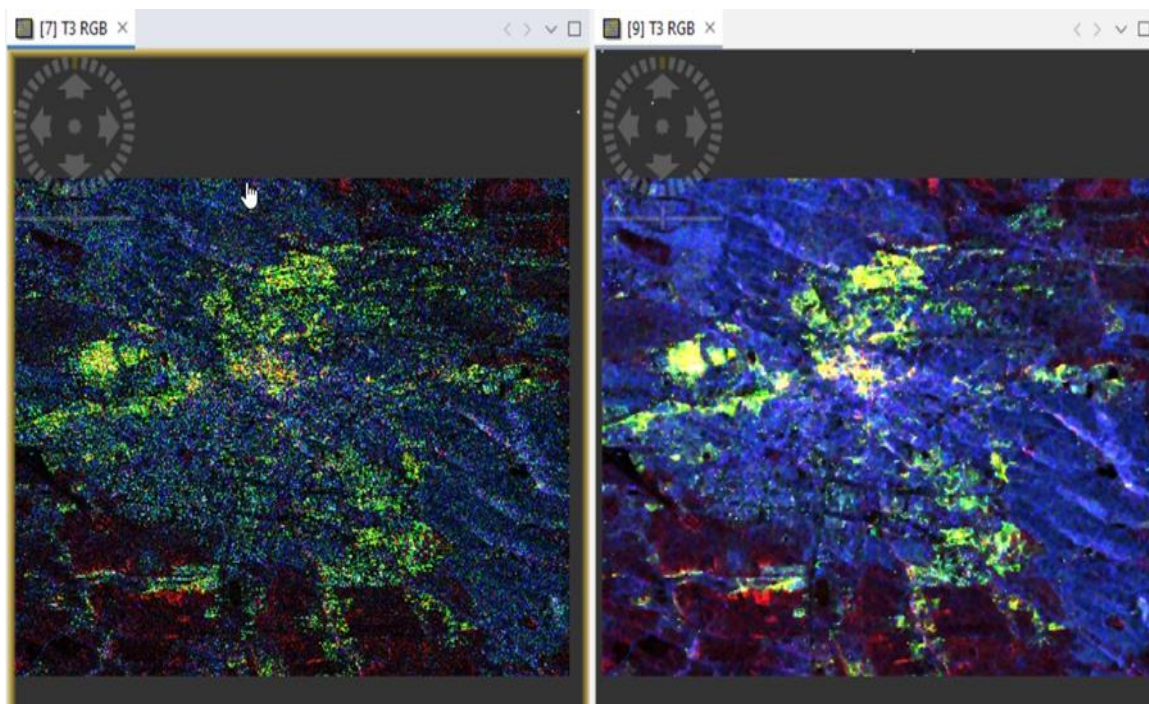


Рисунок 3.5 – Порівняння зображення матриці когерентності ТЗ до і після застосування спекл-фільтру в програмі SNAP.

Поляриметричне розсіювання (декомпозиція) дозволяє роз'єднати різноманітні внески розсіювання, що дає змогу здобути інформацію про природу самого процесу. Існують різновиди поляриметричних розсіювань, розроблені науковцями, що спирались на різні математичні моделі, щоб враховувати специфіку різних типів поверхонь, наприклад [27]:

- Sinclair;
- Pauli;
- Freeman-Durden;
- Yamaguchi;
- Van Zyl;
- Cloude;
- H-a Alpha;
- Touzi.

Аби виконати розсіювання, необхідно обрати матрицю ТЗ зі спекл-фільтром, як вхідні дані, а також з випадаючого меню оператора Radar →

Polarimetric → Polarimetric Decomposition вибрати потрібне розкладання, наприклад, розсіювання Freeman-Durden. Розмір вікна визначає комірку, для якої обчислюється декомпозиція. Стандартним є вікно розміром 5 x 5 пікселів. Рекомендовано в назву результату включити назву інструменту декомпозиції та розмір вікна, що спростить їх подальше розпізнавання.

Результат складатиметься з трьох смуг, або чотирьох, для розсіювання Yamaguchi, кожна з яких відповідає певному механізму розсіювання, наприклад double bounce подвійний відскок (червоний колір), volume scattering об'ємне розсіювання (зелений) та surface scattering поверхневе розсіювання (блакитний).

Шорсткі поверхні породжують яскраве відображення за рахунок поверхневого розсіювання. Рослинні поверхні спричиняють об'ємне розсіювання, яке надає темніший ефект на зображенні. Подвійне розсіювання, що зустрічається переважно в міських місцевостях, дає найяскравішу віддачу, оскільки більша частина енергії повертається до датчика, що можна показати в SNAP як зображення RGB. Створити зображення можливо через Вікно → Відкрити вікно RGB-зображення (рис. 3.6).

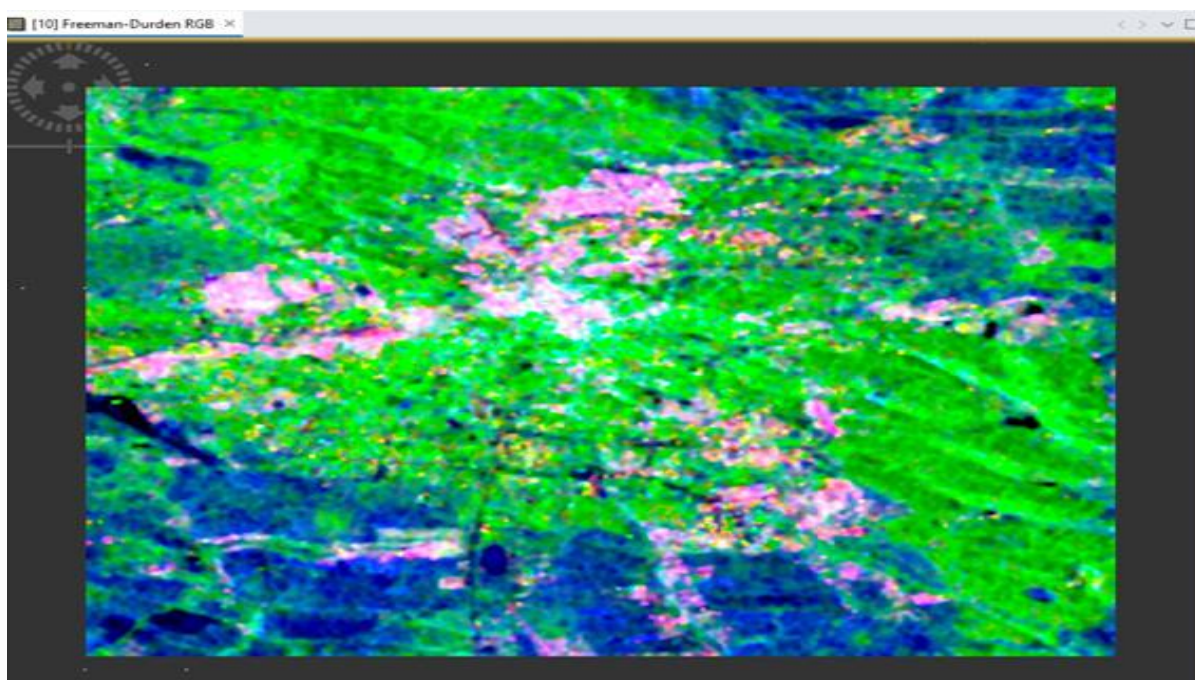


Рисунок 3.6 – Перегляд результатів розсіювання з використанням інструменту Freeman-Durden у вигляді зображення RGB в програмі SNAP.

Окрім декомпозиції Freeman-Durden, аналогічним чином можна згенерувати та проаналізувати інші різновиди декомпозиції, використовуючи інструменти Yamaguchi, Pauli, H-A-Alpha Quad Pol, Touzi.

Оскільки всі створені зображення походять з одного вихідного набору даних, їхні розміри, а саме кількість рядків та стовпців, а також розмір пікселів є ідентичними. Це дозволяє застосовувати їхні канали одночасно для аналізу та зіставлення, наприклад, у вікні перегляду зображення RGB [28].

Комплексне зображення представляє значення каналів RGB, а також канали, отримані з різних інструментів. Для цього, клацнувши правою кнопкою миші у вікні Product Explorer на назві продукту, отриманого за допомогою розкладу Pauli, обираємо команду Open RGB Image Window (рис. 3.7).

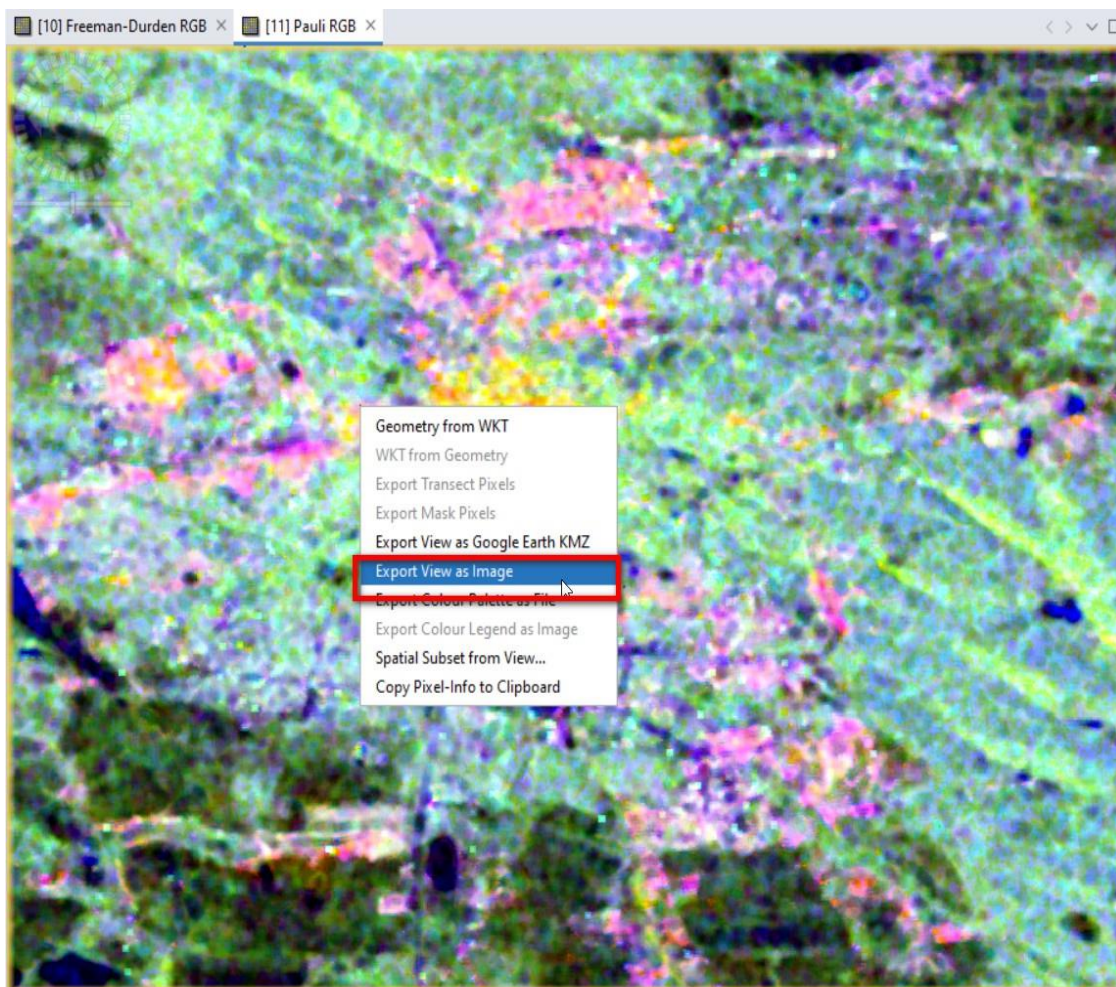


Рисунок 3.7 – Збереження створеного RGB зображення в програмі SNAP.

Створюємо графік розсіювання Scatter Plot, що порівнює два набори растрових даних, враховуючи кожен піксель окремо. Відображаємо дані у декартовій системі координат, де об'ємне розсіювання декомпозиції Yamaguchi на осі X, а об'ємне розсіювання декомпозиції Freeman-Durden на осі Y. При виборі даних, зважаємо на назви інструментів, що використовувались при створенні продуктів, не звертаючи увагу на індекси виду [x]subset..., оскільки їхнє розташування може змінюватися, використовуючи імена інструментів Freeman, Yamaguchi, Pauli, H-A-Alpha та інші [19].

Графік, зображений на рис. 3.8 допоможе визначити відмінності між двома типами декомпозиції та встановити, які саме пікселі зазнають впливу.

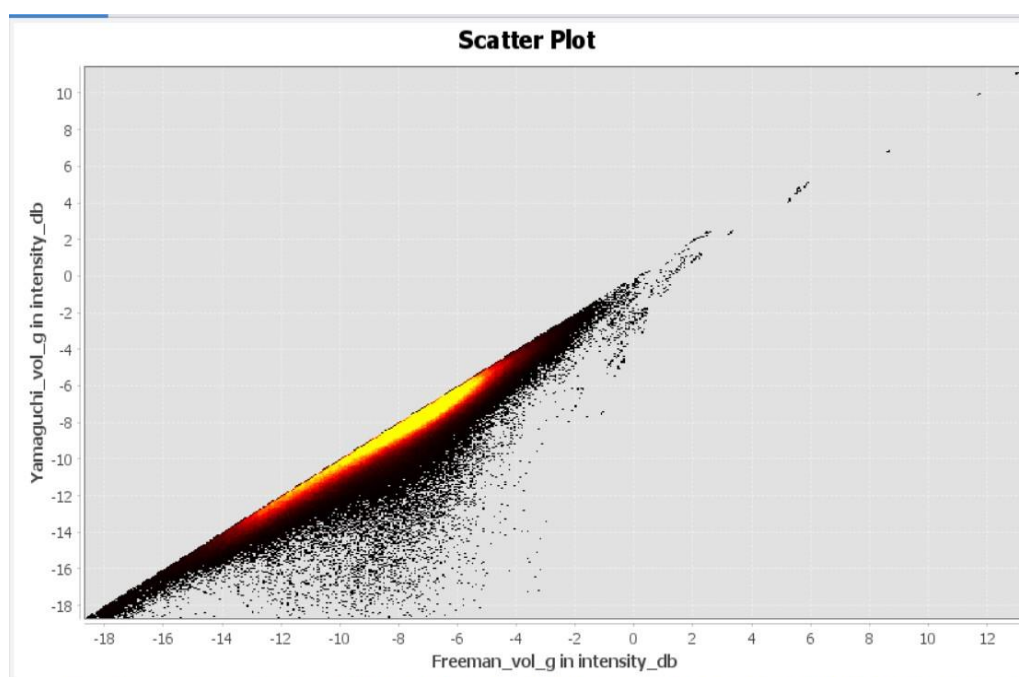


Рисунок 3.8 – Графік розсіювання, що порівнює два набори растрових даних у програмі SNAP.

3.2. Виконання поляриметричної класифікації у програмі SNAP

Використовуючи матрицю T3 зі спекл-фільтром як вхідні дані, реалізовуємо неконтрольовану поляриметричну класифікацію для

об'єднання подібних пікселів у групи. Неконтрольована класифікація не використовує введені дані від користувача, або наперед визначені класи. Замість цього, алгоритм автоматично визначає, які класи існують у даних та до якої групи найкраще віднести кожен піксель.

Щоб запустити інструмент Поляриметрична неконтрольована класифікація, переходимо до меню Радар – Поляриметричні – Поляриметрична класифікація. На вкладці Параметри обробки обираємо Н Альфа класифікація Вішарта та підтверджуємо запуск класифікації натисканням кнопки Виконати. Після завершення процесу класифікації, новий продукт міститиме єдину смугу з полігонами, кожен з яких буде віднесено до одного з дев'яти класів [19].

У новоствореному продукті, що представляє дев'ять різних класів, у вікні налаштування кольорів можна змінити кольори, які відповідають кожному класу. Для вибору нового кольору можна скористатись меню вибору кольору (рис. 3.9).

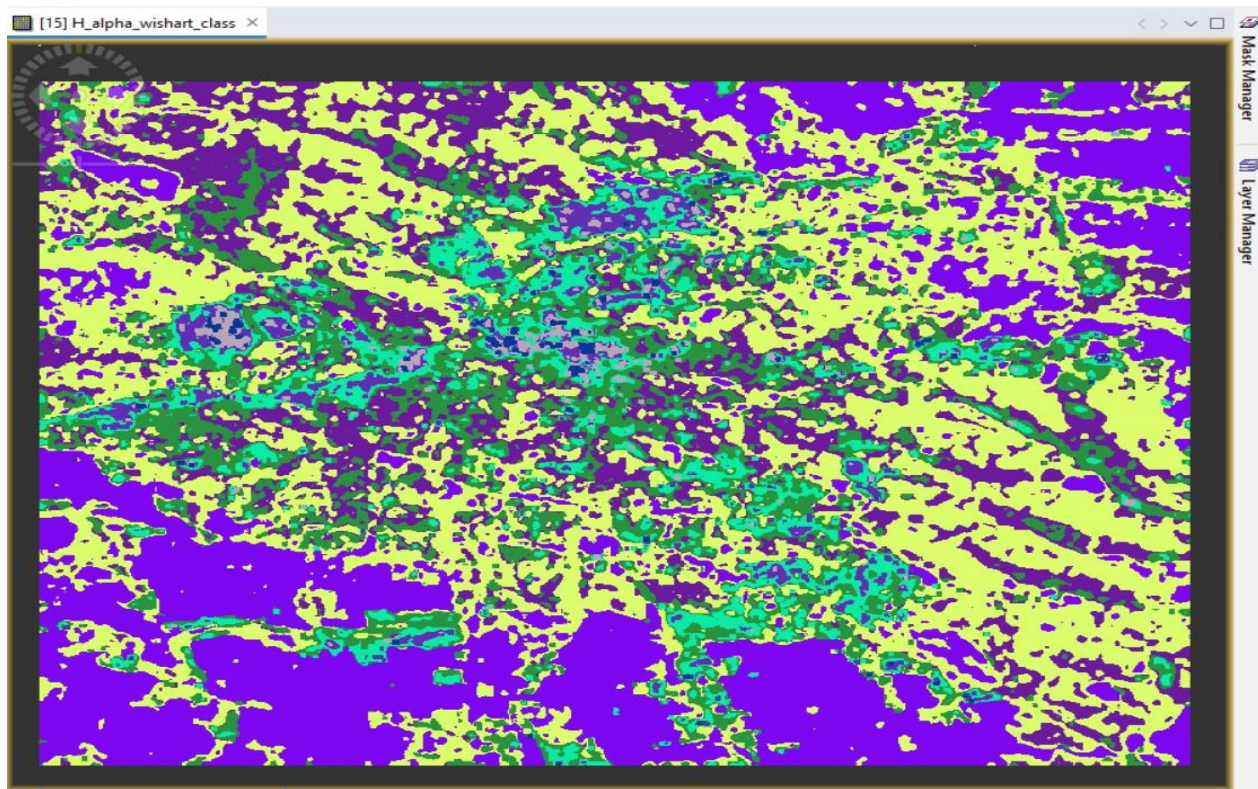


Рисунок 3.9 – Результат неконтрольованої класифікація Wisharta у програмі SNAP.

Класифікатор Wisharta ґрунтується на використанні співвідношення Ентропія (H) до Альфа (α), реалізується шляхом розрахунку центрів дев'яти кластерів та віднесення пікселів до кластерів на основі їх відстані Wisharta до цих центрів.

Класи можна інтерпретувати згідно з класифікацією Н- α . Для розуміння їх розподілу, варто застосувати декомпозицію НА-Alpha Quad Pol, що включає в себе створення каналів ентропії, анізотропії та альфа. Її необхідно сформувати на попередньому етапі за допомогою Radar $\rightarrow$ Polarimetric $\rightarrow$ Polarimetric Decomposition $\rightarrow$ Processing Parameters $\rightarrow$ НА-Alpha Quad Pol. Далі відкриваємо один з створених каналів та створюємо графік Н- α альфа інструментом View – Tool Windows – Radar– Н- α Alpha Plot, натиснувши на інструмент оновлення перегляду для побудови графіка (рис. 3.10).

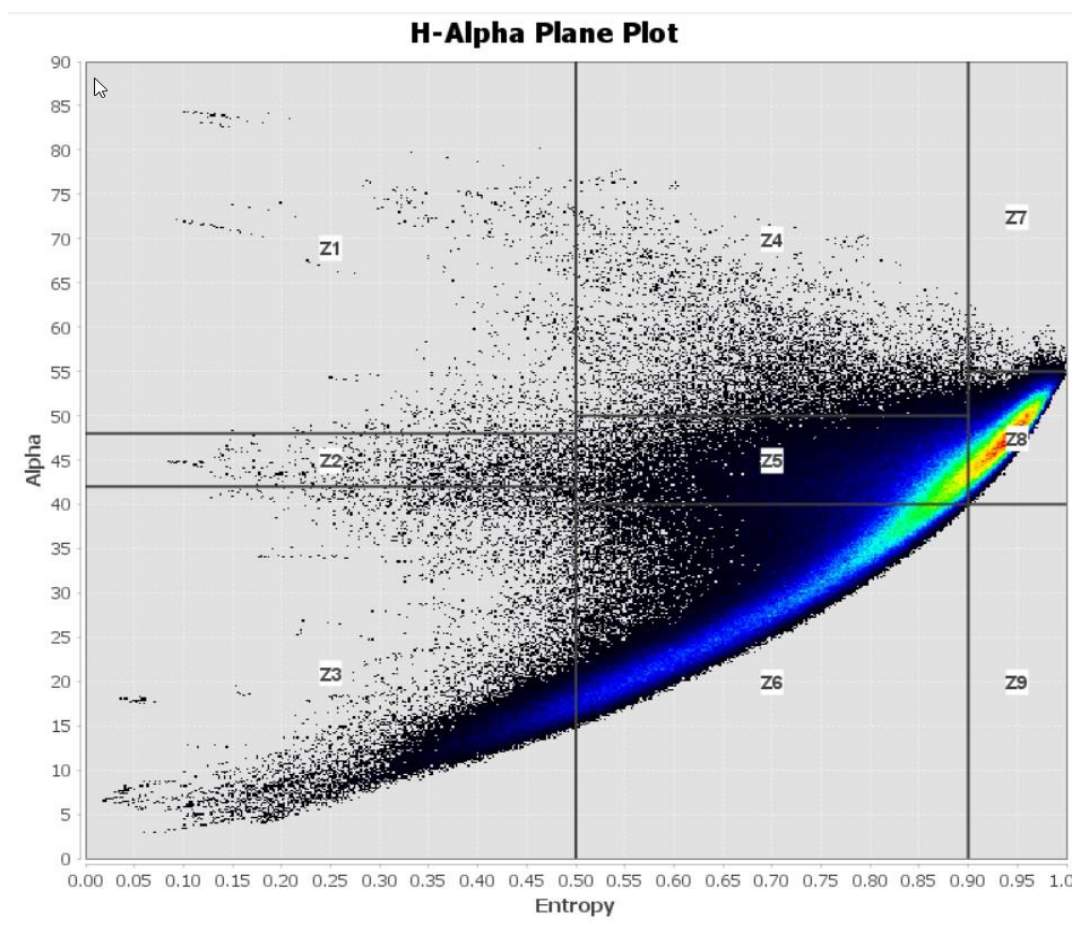


Рисунок 3.10 – Графік співвідношення Н- α альфа у програмі SNAP.

Всі попередні етапи обробки були пов'язані з квадратурними, або повними поляриметричними даними SAR (QuadPol), які вимагали, щоб поляризації, які передавалися та приймалися, були ортогональними парами. На противагу цьому, компактна поляриметрія (CP) передає кругову поляризацію (під кутом 45 градусів, або зсувом на 90 градусів) та приймає дві ортогональні, взаємно когерентні лінійні поляризації (DualPol).

Ця специфічна конфігурація на цей час підтримується обмеженою кількістю місій, але SNAP дозволяє симулювати компактні поляриметричні продукти з даних квадратичної поляризації. Для цього необхідно виконати Radar – Polarimetric – Compact Polarimetry – CP Simulation та обрати відкалібрований геокодований продукт, як вхідні дані. У другій вкладці вибрати Right Circular Hybrid Mode та Covariance Matrix C2, як формат вихідних даних. На виході ми отримуємо комплексну коваріаційну матрицю з елементами C11 і C22.

Отримані елементи можуть бути використані для оцінки CP Stokes Parameters, які можуть бути застосовані для опису частково поляризованих електромагнітних хвиль, використовуючи ступінь поляризації Radar – Polarimetric – Compact Polarimetry – CP Stokes Parameters. Результатом буде продукт, що включає в себе CP Stokes Parameters (g_0 , g_1 , g_2 та g_3), які можна відобразити у вікні RGB зображення, а також всі обрані параметри оператора [19].

Далі виконуємо команду Radar – Polarimetric – Compact Polarimetry – CP Decomposition для вхідного продукту комплексної матриці коваріації. У вкладці Параметри обробки обираємо інструмент Розсіювання M-Chi M-Chi Decomposition. Перегляд RGB зображення згідно з результатами обробки показано на рис. 3.11.

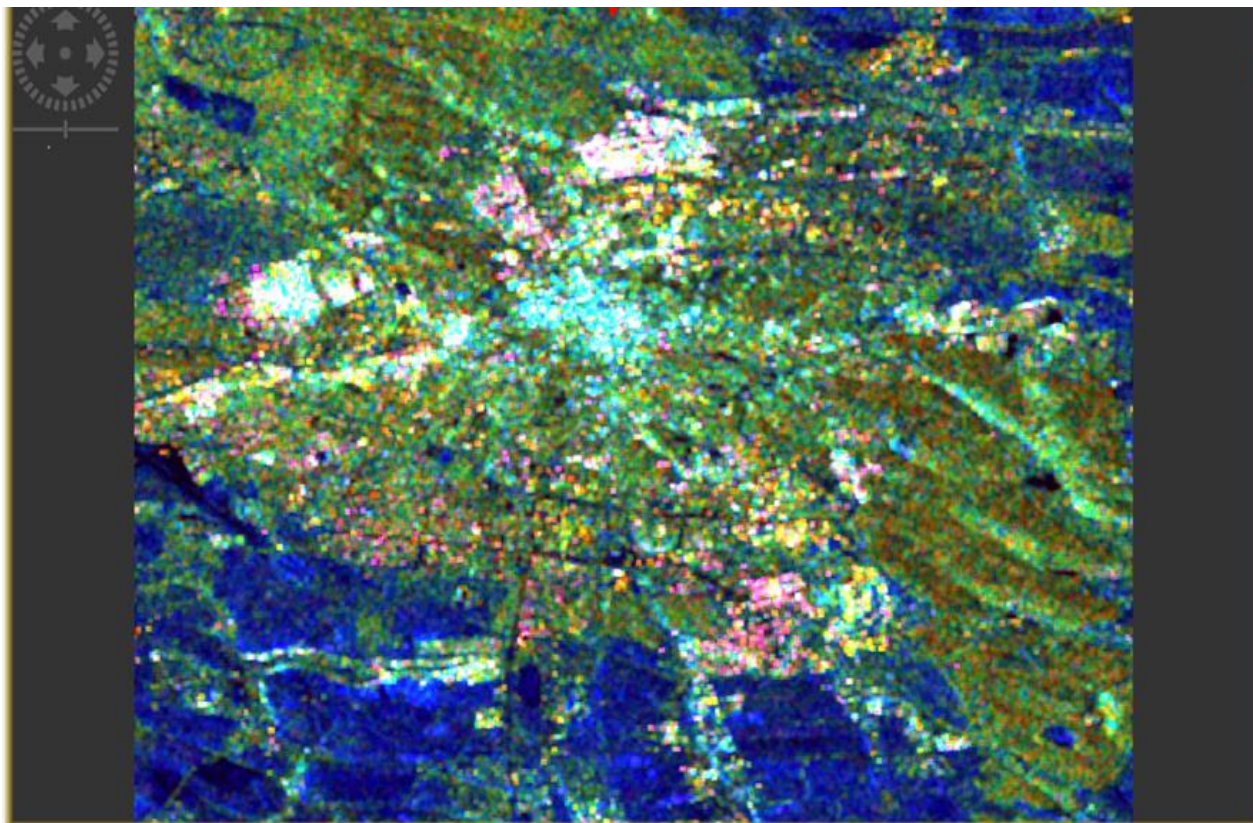


Рисунок 3.11 – Перегляд RGB зображення для M-Chi Decomposition у програмі SNAP.

3.3. Здійснення аналізу густоти забудови міста Львова

Для здійснення аналізу густоти забудови Львова та його приміських зон, необхідно завантажити точковий шейп-файл, представлений набором файлів із різними розширеннями. Відповідний шейп-файл включає дані про розрахункову щільність забудови, створені для мережі точок, що були згенеровані раніше.

Шейп-файл сформовано на основі інформації про полігональні об'єкти, що ідентифікують будівлі. Ці об'єкти було імпортовано з Open Street Map. У геоінформаційній системі QGIS було визначено центроїди цих полігональних об'єктів. Для них застосовано метод Heatmap з радіусом 100 метрів для створення карти щільності. Далі було згенеровано регулярну сітку точок. За допомогою інструменту накладання шарів для кожної точки були визначені відповідні значення щільності забудови з растрової моделі теплової карти.

Саме цей точковий шар було збережено для подальшого аналізу даних в SNAP.

У програмі SNAP зазначаємо ім'я продукту, що утворений розкладанням Паулі, потім переходимо до верхнього меню, де реалізуємо наступну послідовність команд Вектор – Імпорт – ESRI Shapefile та обираємо збережений файл і натискаємо відкрити. Точки тепер мають вигляд білих хрестиків на відображеному зображенні. Ми можемо відредагувати їх візуальний стиль, клацнувши у менеджері шарів та відкривши редактор шарів, задавши відповідні значення для налаштувань штрих і товщина штриха, щоб зробити відображення хрестиків більш наочним.

Далі обираємо інструмент Analysis – Correlative Plot. У вікні Product Explorer клікаємо по назві каналу Pauli_r, після чого вибираємо джерело точкових даних і поле даних. На графіку кореляції буде відображено значення растру на осі ординат та значення атрибутів точок на осі абсцис. Додатково можна показати лінійну регресію, увімкнувши опцію Show regression line. Лінійна регресія демонструє позитивну лінійну залежність між досліджуваними змінними, з коефіцієнтом детермінації (R^2) рівним 0,143. Це означає, що 14,3 % дисперсії щільності забудови може бути пояснено червоним компонентом розкладання Паулі, що вказує на подвійне розсіювання. Зелений (об'ємне розсіювання) та синій (поверхневе розсіювання) компоненти, мають показники R^2 нижче: $R^2 = 0,094$ та $R^2 = 0,109$ відповідно (рис. 3.12).

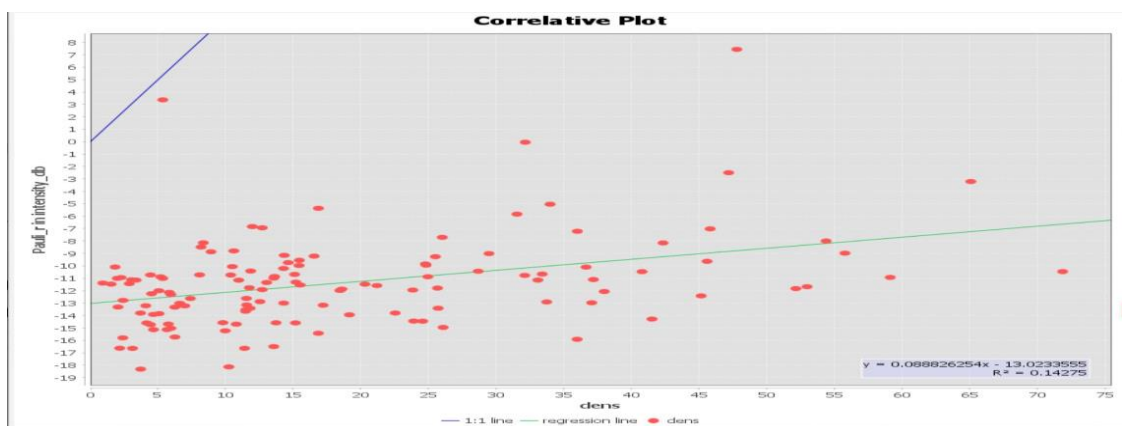


Рисунок 3.12 – Кореляційний графік для щільності забудови міста Львова у програмі SNAP.

Для того, щоб самостійно виявити обернену залежність щільності забудови можна експортувати дані графіку у Excel. Для цього необхідно скористатись кнопкою Switch to Table View. Натиснувши правою кнопкою миші в будь-якому місці таблиці, виконуємо Copy Data to Clipboard. Далі запускаємо програму Excel та вставляємо скопійовану таблицю, що дає змогу створити точкову діаграму для візуалізації залежності щільності забудови від подвійного розсіювання. Є можливість додати лінію тренду, позначивши опції показу рівняння тренду та коефіцієнта детермінації на діаграмі [19].

Менеджер масок дозволяє виділити пікселі, які відповідають певним критеріям. Растровий продукт, або RGB-композиція має бути відкритим в поточному вікні, щоб інструменти менеджера масок стали доступними. Для тестування функціоналу використаємо декомпозицію Yamaguchi, яка вже була створена. Відкриємо зображення каналу Yamaguchi_vol_g у вікні перегляду. Насамперед, у вікні Mask Manager необхідно створити маску для забудованих зон. Далі у Mask Manager відобразиться створена умова, колір виділених пікселів забудованих територій набуде червоного кольору.

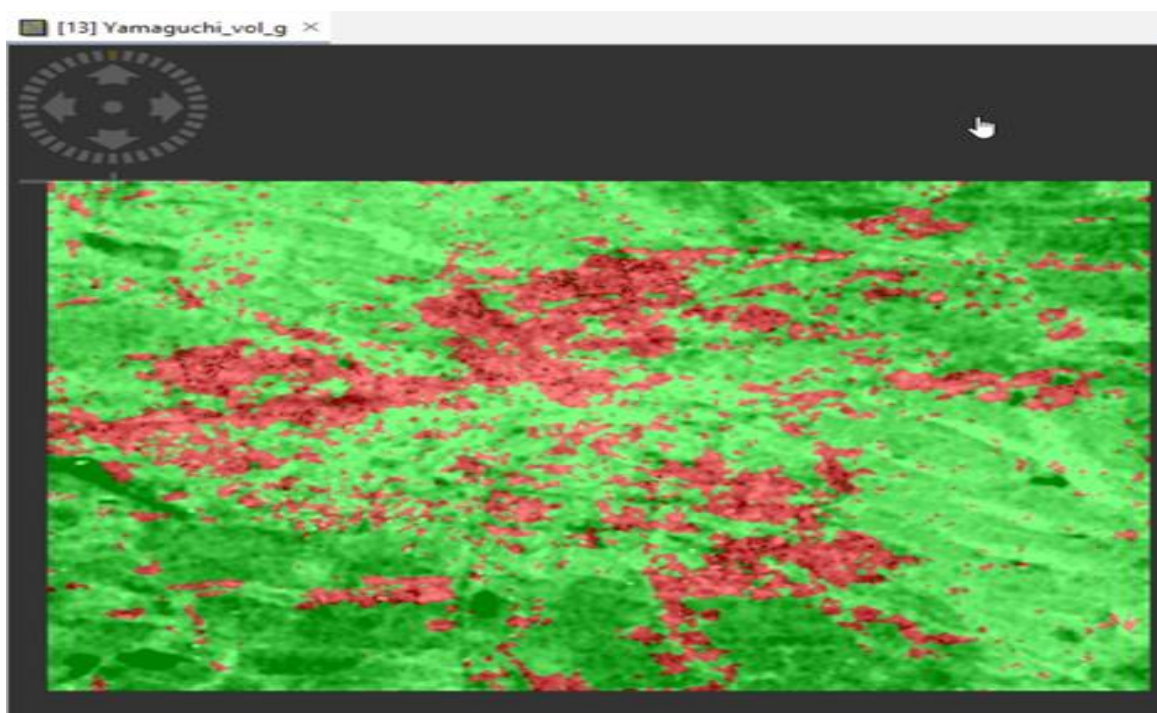


Рисунок 3.13 – Візуалізація створених масок у вікні Mask Manager для забудованих територій міста Львова у програмі SNAP.

Створивши лише дві маски забудованих територій і ландшафтного покриття, які взаємо виключаються (кожен піксель належить лише одному класу) одержуємо їхнє відображення. Щоб зберегти одержані результати дослідження, перш за все необхідно відібрати необхідний набір даних у Product Explorer. Далі слід скористатися командою File → Save або File → Save as.

Результат аналізу забудованих територій міста Львова у програмі SNAP відображено на рис. 3.14.

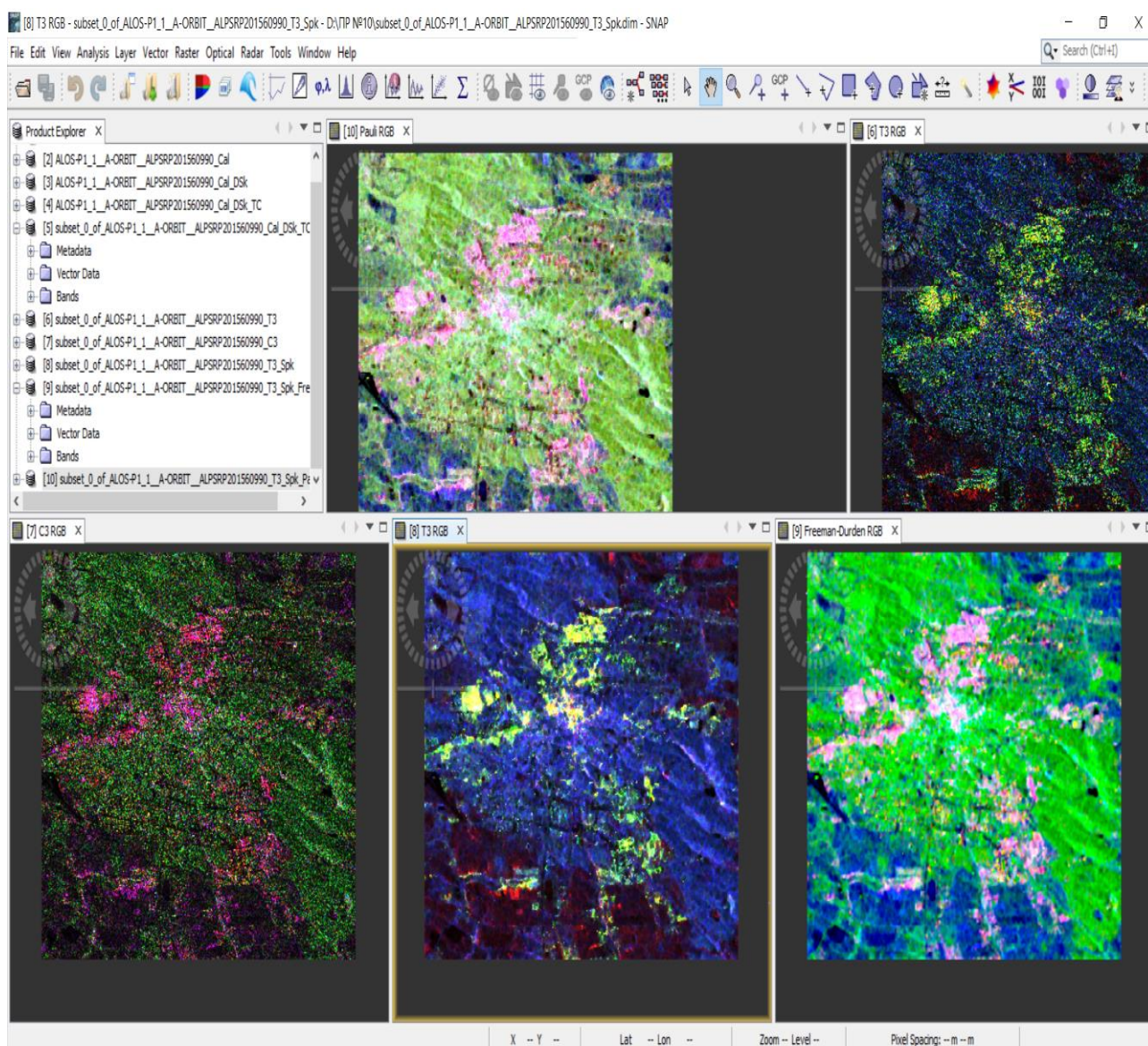


Рисунок 3.14 – Результат аналізу забудованих територій міста Львова у програмі SNAP.

Аналіз щільності забудови є ключовим компонентом вивчення урбанізованого простору, оскільки дає змогу ідентифікувати просторові закономірності розвитку, рівень ущільнення житлових районів, навантаження на інфраструктуру та виокремити зони можливого розширення меж населеного пункту. На основі поляриметричних SAR-даних із супутника ALOS PALSAR-1, оброблених у програмному середовищі SNAP, проведено оцінку щільності забудови міста Львова.

Для аналізу було застосовано результати декомпозиції Freeman-Durden та Yamaguchi, які дають змогу розділити сигнали SAR за типами розсіювання: поверхнєве, об'ємне та подвійне. Саме подвійне розсіювання є типовим для вертикальних конструкцій міського середовища (будівель, фасадів, щільної забудови) і використовується, як показник інтенсивності забудови.

Отриманий шар щільності забудови було відкрито у форматі двох кольорів: зеленого – для ландшафту та червоного – для забудови. Результати аналізу відобразили найбільші значення густоти забудови, що зафіксовані в історичному центрі Львова та багатоповерхових житлових районах. Низькі значення переважають у садибній забудові (передмістя), індустріальних і не забудованих зонах. Деякі колишні промислові зони (Персенківка, Рясне) демонструють середній рівень щільності, що є свідченням їхньої активної забудови у майбутньому.

4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

В Україні головними причинами, що призвели до загрози стану довкілля є:

- застаріла технологія виробництва та обладнання,
- висока енергомісткість та матеріаломісткість, що перевищують у два-три рази відповідні показники відповідних країн;
- високий рівень концентрації промислових об'єктів;
- несприятлива структура промислового виробництва з високою концентрацією екологічно небезпечних виробництв,
- відсутність належних природоохоронних систем (очисних споруд, оборотних систем водозабезпечення тощо);
- низький рівень експлуатації існуючих природоохоронних об'єктів;
- відсутність належного правового та економічного механізмів, які б стимулювали розвиток екологічно безпечних технологій та природоохоронних систем;
- відсутність належного контролю за охороною довкілля.

Оскільки, виробнича діяльність спричиняє порушення природної середовища, суспільству випадає взяти на собі занепокоєння щодо відновлення її властивостей та охорони від подальшої деградації.

Цілі охорони природи мають ставитись рівнозначно з іншими цілями використання (виробництвом продуктів харчування, промисловим виробництвом та створенням інфраструктури).

В Україні охорона довкілля розглядається як самостійно політичне завдання.

Політика щодо довкілля – це сукупність усіх дій, спрямованих на уникнення втручання в довкілля, на його зменшення та на усунення пошкоджень довкілля, що вже сталися.

Конкретні цілі та програми стосуються насамперед:

- визначення граничнодопустимих значень шкідливих для довкілля

викидів;

- економії енергії;
- сприяння використанню відходів тепла;
- утилізація старих матеріалів, а також відходів;
- підтримання здоров'я лісів та природної сили самоочищення водойм;
- впровадження автомобілів з мінімальною кількістю відпрацьованих газів та бензинів без вмісту свинцю;
- заохочення бережливого ставлення споживачів до довкілля.

Заходи щодо поліпшення довкілля , а саме:

- 1) технологічні – розробка та впровадження нових технологій, очисних споруд, видів палива;
- 2) архітектурно-планувальні – озеленення населених пунктів, організація санітарно-захисних зон, раціональне планування підприємств та житлових масивів;
- 3) інженерно-організаційні – зниження інтенсивності руху транспорту на перевантажених автомагістралях, організація екологічно-патрульного контролю;
- 4) економічні – вкладання коштів у розвиток нових, ресурсозберігаючих технологій;
- 5) правові – прийняття та дотримання законодавчих актів щодо підтримання якості атмосфери, водойм, ґрунту;
- 6) освітянсько-виховні – формування екологічної культури, насамперед у молоді.

Охорона природи має проводитися лише в поєднанні з сільським господарством, оскільки тут можуть врівноважитись найзначніші за площею екосистеми. Важливими вимогами є:

- уникання будь-якої інтенсифікації використання;
- обмеження розмірів, широкі смуги околиць;
- розширення сівозмін з місцевими видами та сортами замість централізовано вирощуваних високопродуктивних видів;

- скорочення застосування добрив;
- недопущення виливання рідкого гною на сільськогосподарські площі, натомість – кругообіг органічних відходів;
- підтримка природних методів господарювання;
- перехід від грошової допомоги виробництву до допомоги, пов'язаної з певними місцями;
- врахування досягнень сільського господарства для забезпечення природного балансу.

Правовий метод охорони довкілля ґрунтується на здатності права визначати міру:

- можливого (власне право громадянина);
- належного (обов'язки громадянина);
- відповідальності (відповідальність громадянина) поведінки людей, підприємств або держав.

Норми екологічного права є обов'язковими, якщо вони формально встановлені та закріплені законом і підкріплюються методами державного примусу.

Використання економічних критеріїв в екології повинно бути направлено на реалізацію головного принципу: не максимізація прибутків підприємців або держави, а досягнення стійкого розвитку шляхом збалансованого природокористування так, щоб розвиток матеріального виробництва в будь-якому регіоні забезпечував стійкість екосистем. Економічне забезпечення збереження здорового природного середовища різноманітне та включає в себе такі головні аспекти:

- 1) державне фінансування заходів з охорони природи;
- 2) ліцензування.

Екологізація економіки передбачає подолання усталених уявлень про виробничі процеси в системі ресурси - технологія і, отже, має здійснюватися на засадах:

- формування правових і організаційних умов для раціонального

природокористування;

- створення науково-технічного потенціалу для переорієнтації економіки на ресурсозберігаючі технології;

- зміна основних напрямків суспільного виробництва, культури споживання;

- створення замкнених виробничих циклів, надання пріоритетності безвідходним технологіям;

- упорядкування системи обліку виробництва продукції з урахуванням вартості природних ресурсів [14].

ВИСНОВКИ

В рамках написання кваліфікаційної роботи було здійснено повний цикл застосування методики SAR-поляриметрії для вивчення міської забудови на прикладі міста Львова. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано доцільність використання SAR-даних в дослідженнях міських територій. Враховуючи незалежність SAR-поляриметрії від погодних умов, хмарності та освітлення, що дає змогу проводити системний моніторинг міських районів у будь-який час року та доби і є її ключовою перевагою над оптичними методами дистанційного зондування Землі.

Проаналізовано науково-технічні засади SAR-поляриметрії. У роботі розглянуто фізичні основи електромагнітного розсіювання, поляризаційні стани хвиль та принципи формування когерентних і коваріаційних матриць, які є основою обробки в SAR-поляриметрії.

Виконано повну обробку знімку ALOS PALSAR-1 (рівень 1.1 Complex) у програмному середовищі SNAP, а саме:

- відкриття, калібрування та геометричне вирівнювання (ALOS Deskewing);
- радіометричне калібрування з отриманням значень зворотного розсіювання;
- геокодування та корекція рельєфу з використанням цифрової моделі висот (SRTM);
- обрізку за зоною інтересу.

Згенеровано матриці когерентності T3 та коваріації C3, що дозволило виконати подальший поляриметричний аналіз. Було використано поляриметричний спекл-фільтр для усунення шумів, притаманних SAR-даним, зі збереженням комплексної інформації.

Здійснено поляриметричну декомпозицію з використанням методів Freeman-Durden, Yamaguchi, Pauli, що дозволило візуалізувати різні механізми розсіювання (подвійне, об'ємне, поверхневе) та встановити просторові

особливості їх розподілу в межах міста.

Проведено аналіз щільності забудови міста Львова. На основі інтенсивності подвійного розсіювання (double bounce), характерного для вертикальних конструкцій (будівель), було створено тематичну карту, яка показує розподіл щільності забудови. Виявлено, що найбільш щільно забудованими залишаються центральні райони – Галицький, Франківський та частина Шевченківського, в той час як периферійні райони характеризуються меншою інтенсивністю міської забудови.

Здійснено порівняння результатів різних типів декомпозиції. За допомогою графіків розсіювання (scatter plots) виконано порівняльний аналіз компонентів декомпозицій Freeman-Durden і Yamaguchi, що дозволило визначити взаємозв'язки між типами покриття та інтенсивністю сигналу.

Застосована методика показала високу чутливість до елементів міського середовища, зокрема архітектурних об'єктів, транспортної інфраструктури та відкритих територій. Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх застосування в подальших містобудівних дослідженнях, кадастровому моніторингу, управлінні міським середовищем, екологічному плануванні та збереженні історичних кварталів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ананченко В. А., Борисенко О. В. Основи дистанційного зондування Землі: навч. посіб. Київ, 2018. 308 с.
2. Власенко Н. П., Савчук Я. Р. Геоінформаційне моделювання урбанізованих територій. Черкаси, 2018. 198 с.
3. Галаган О. М., Лисенко С. І. Дистанційне зондування та обробка супутникових знімків. Чернівці, 2021. 188 с.
4. Гладкий Ю. М., Василенко І. П. Геоінформаційні системи в природокористуванні: навч. посіб. Львів, 2017. 242 с.
5. Головне управління статистики у Львівській області. Статистичний щорічник Львівської області. Львів, 2023. URL: <https://lv.ukrstat.gov.ua>
6. Департамент містобудування ЛМР. Огляд містобудівних тенденцій у Львові. Львів, 2023. URL: <https://city-adm.lviv.ua>
7. Державна служба статистики України. Щільність населення міст України. 2024. URL: <https://ukrstat.gov.ua>.
8. Дорош О. А. Методи просторового аналізу у плануванні міських територій. Київ, 2020. 112 с.
9. Іванюк О. М., Кравчук І. М. Геоінформаційні технології в кадастрі та управлінні простором. Тернопіль, 2019. 226 с.
10. Ковальчук В. В. Методи обробки даних дистанційного зондування Землі. Київ, 2019. 312 с.
11. Львівська міська рада. Оновлення Генерального плану м. Львова. 2023. URL: <https://city-adm.lviv.ua>.
12. Мальська М. П., Кузик М. В. Геоінформаційні системи в аналізі просторових процесів. Львів, 2020. 256 с.
13. Мельничук Ю. Т. Аерокосмічні методи дослідження Землі: навч. посіб. Львів, 2016. 215 с.
14. Охорона навколишнього середовища. URL: <https://studfile.net/preview/5512284/>.

15. Попов М. О., Трохимчук О. М. Системи дистанційного зондування Землі: навч. посіб. Київ, 2019. 248 с.
16. Про охорону земель: Закон України № 962-IV від 19.06.2003 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/962-15>.
17. Рижок З. Р., Поляковська Л. Л., Ступень Р. М., Колодій П. П. Математична обробка геодезичних вимірів: навч. посібник. Львів: «Галицька видавнича спілка», 2020. 179 с.
18. Рижок З.Р. Застосування систем координат у структурі геопросторових даних. Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій: матеріали XXII Мінар. наук.-практ. форум. (м. Львів, 5-7 жовтня 2021 р.). Львів, 2021. С. 22-25.
19. Робочий зошит з основ дистанційного зондування Землі. Аналіз радарних супутникових знімків / С. М. Бабійчук, С. Т. Пікуль, О. В. Томченко та ін.; за ред. С. О. Довгого. Київ, 2025. 252 с.
20. Слободянюк О. А. Дистанційне зондування Землі в містобудуванні. Львів, 2016. 185 с.
21. Стадник В. І., Ніконенко М. А. Методи обробки супутникової інформації у ГІС. Харків, 2017. 204 с.
22. ESA Sentinel Applications: Urban Mapping. ESA, 2024. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Urban_mapping.
23. Freeman A., Durden S. L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. Vol. 36(3). P. 963–973.
24. Geoportal.lviv.ua. Публічна кадастрова карта Львова. URL: <https://geoportal.lviv.ua>.
25. SNAP ESA Toolbox Documentation. ESA, 2023. URL: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>.
26. Stupen R., Ryzhok Z., Stupen N., Stupen O. Application of remote sensing technologies to determine the content of soil fertility main elements. Management,

Economic Engineering in Agriculture and rural development. Vol. 21, Issue 1. P. 735-740. URL: <http://managementjournal.usamv.ro/index.php/scientific-papers/2473-application-of-remote-sensing-technologies-to-determine-the-content-of-soil-fertility-main-elements>.

27. Touzi R. A review of polarimetric SAR image analysis and interpretation techniques. Canadian Journal of Remote Sensing. 2007. Vol. 33(1). P. 27–46.

28. Yamaguchi Y., Moriyama T., Ishido M., Yamada H. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2005. Vol. 43(8). P. 1699–1706.