

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями

Кафедра геоінформатики і фотограмметрії

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

проф., д.т.н. Карпінський Ю.О.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Моделювання міських руйнувань Маріуполя за допомогою дистанційного зондування та машинного навчання

Виконав студент групи ГСТ-51  
193 «Геодезія та землеустрій»  
Геоінформаційні системи і технології  
Мічкін О.Д.

Керівник: Гебрин-Байди Л.В., доц.  
*Ідентичність підтверджую*

Київ 2023 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями

Кафедра: Геоінформатики і фотограмметрії

Освітній рівень: «магістр за ОПП»

Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій»

Спеціалізація: Геоінформаційні системи і технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Декан факультету

\_\_\_\_\_доцент., к.т.н. Нестеренко О.В.

“\_\_” \_\_\_\_\_ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я  
ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Мічкін Олександр Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи:** Моделювання міських руйнувань Маріуполя за допомогою дистанційного зондування та машинного навчання  
затверджена наказом ректора КНУБА № 2487/2 від «19» жовтня 2023 року

**2. Керівник роботи** доц. Гебрин-Байди Лілія Василівна \_\_\_\_\_  
( прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

**3. Строк подання студентом роботи до захисту:** 21 грудня 2023 р.

**4. Зміст пояснювальної записки за розділами:**

Розділ 1. Застосування даних дистанційного зондування для ідентифікації змін у земельному покритті

Розділ 2. Застосування методів машинного навчання для аналізу оптичних та радарних даних

Розділ 3. Розробка алгоритму в Google Earth Engine для виявлення змін в забудованих територіях Маріуполя

Розділ 4. Результати класифікації руйнувань на основі моделі машинного навчання

**5. Графічний матеріал за розділами**

Р. 1. Візуалізація електромагнітного спектру. Графік спектральної яскравості поверхонь. Схема принципу роботи радару із синтезованою апертурою

Р. 2. Схеми ефектів розсіювання від поверхонь. Концептуальна схема алгоритму пошуку змін

Р. 3. Карти класифікованих поверхонь.

Р. 4. Карти моделей руйнувань міста та районів. Кругові діаграми відношення змін у забудові.

## 6. Календарний план виконання роботи:

Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту ( роботи )
Розділ 1. Застосування даних дистанційного зондування для ідентифікації змін у земельному покритті. Завдання проекту, огляд попереднього світового досвіду.	01.10.23
Розділ 2. Методологія моделі машинного навчання. Інтеграція оптичних та радарних даних. Схема моделі машинного навчання. Концептуальна схема алгоритму пошуку змін.	22.10.23
Розділ 3. Розробка алгоритму в Google Earth Engine для виявлення змін в забудованих територіях Маріуполя. Збір вихідних даних. Карта обмежень проекту. Супутникові знімки Sentinel-1 та Sentinel-2. Структура коду.	07.11.23
Розділ 4. Результати класифікації руйнувань на основі моделі машинного навчання. Точність алгоритму. Верифікація результату зі знімками Google Earth. Створення тематичних карт для кожного району Маріуполя.	12.11.23
Остаточне оформлення роботи	20.11.23
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	27.11.2023
Попередній захист роботи на кафедрі	06.12.2023

## 7. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 1.			
Розділ 2.			
Розділ 3.			
Розділ 4.			

## 8. Дата видачі завдання 06.09.2023

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ Карпінський Ю.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник \_\_\_\_\_ Гебрин-Байди Л.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Студент \_\_\_\_\_ Мічкін О.Д.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

<b>РЕЗЮМЕ</b> (summary)			
<i>до атестаційної випускної роботи студента:</i>		<b>Мічкін, Олександр Дмитрович</b>	
<i>ЗВО</i>	Київський національний університет будівництва і архітектури		
<i>Тема</i>	Моделювання міських руйнувань Маріуполя за допомогою дистанційного зондування та машинного навчання		
<i>Освітній ступень</i>	Магістр за освітньо-науковою програмою навчання		
<i>Факультет</i>	Геоінформаційних систем та управління територіями		
<i>Кафедра</i>	Геоінформатики і фотограмметрії		
<i>Спеціальність</i>	193 Геодезія та землеустрій		
<i>Спеціалізація</i>	Геоінформаційні системи і технології		
<i>Керівник</i>	Гебрин-Байди Лілія Василівна		
<i>Обсяг роботи</i>	<i>Пояснювальна записка</i>	<i>Розділів</i>	<i>Креслень формату</i>
	77	4	A4 9
<i>Розділ 1</i>	Розглянуті базові принципи дистанційного зондування Землі за допомогою оптичного та радарного знімання, приладами мультиспектрального спостереження та радару з синтезованою апертурою. Визначена методологія використання даних супутникового спостереження для фіксації змін на земній поверхні. Розглянуті засади керованої класифікації зображень за допомогою машинного навчання. Описані технічні особливості супутників Sentinel-1 та		

	Sentinel-2. Проаналізовані можливості хмарної платформи Google Earth Engine.
<i>Розділ 2</i>	Розглянуті переваги застосування алгоритму машинного навчання Random Forest для класифікації земного покриву. Обґрунтований вибір методів класифікації даних. Створена концептуальна схема алгоритму комбінованої класифікації
<i>Розділ 3</i>	Створено код на мові JavaScript для автоматичної класифікації земного покриву та аналізу змін в інфраструктурі міста.
<i>Розділ 4</i>	Створені тематичні карти змін у забудові кожного району Маріуполя. Порахована кількість окремих змін. Виконана оцінка точності. Запропоновані можливі варіанти для вдосконалення алгоритму та моделювання руйнувань.
<i>Висновки по роботі</i>	Розроблений скрипт на мові JavaScript для автоматичної класифікації земного покриву та аналізу змін в інфраструктурі міста Маріуполь. Поєднання радарних та мультиспектральних даних дозволило створити точнішу модель класифікації поверхні.
<p><b><u>Ключові слова:</u></b> Дистанційне зондування Землі, радар з синтезованою апертурою, мультиспектральне сканування, Google Earth Engine, класифікація, оцінка руйнувань, Маріуполь.</p> <p><b><u>Keywords:</u></b> Remote Sensing, Synthetic Aperture Radar, Multispectral scanning, Google Earth Engine, classification, damage assessment, Mariupol.</p>	

Укладач: \_\_\_\_\_  /Мічкін О.Д./

Керівник: \_\_\_\_\_  /Гебрин-Байди Л.В./

«19» \_\_\_\_\_ грудня 2023

## Зміст

ВСТУП .....	8
Розділ 1 .....	12
ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЗМІН У ЗЕМЕЛЬНОМУ ПОКРИВІ .....	12
1.1 Переваги мультиспектрального сканування у виявленні руйнувань .....	13
1.2 Використання радарних даних для оцінки змін в урбанізованих територіях ..	16
1.3 Методологія класифікації супутникових зображень.....	20
1.4 Технічні особливості супутників Sentinel-1 та Sentinel-2 .....	21
1.5 Аналітика можливостей хмарної платформи Google Earth Engine .....	23
1.6 Структурний аналіз метаданих супутникових зображень .....	24
1.7 Висновки до першого розділу.....	25
Розділ 2 .....	27
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ОПТИЧНИХ ТА РАДАРНИХ ДАНИХ .....	27
2.1 Застосування алгоритму Random Forest для класифікації знімків.....	28
2.2 Візуальний аналіз руйнувань за допомогою Google Earth.....	29
2.3 Методи виявлення змін на основі супутникових знімків .....	30
2.4 Інтеграція оптичних та радарних даних для підвищення точності аналізу .....	33
2.5. Висновки до другого розділу .....	35
Розділ 3 .....	36
РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ В GOOGLE EARTH ENGINE ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗМІН В ЗАБУДОВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ МАРІУПОЛЯ.....	36
3.1 Географічна та урбаністична характеристика Маріуполя .....	37

3.2 Підготовка даних супутників Sentinel-1 та Sentinel-2 .....	38
3.3 Створення набору даних для тренування та валідації моделей .....	41
3.4 Класифікація забудованих ділянок застосовуючи індекс NDBI та інтеграції оптичних даних із радарними .....	42
3.5 Статистичний аналіз змін у забудові .....	44
3.6. Висновки до третього розділу.....	46
Розділ 4 .....	47
РЕЗУЛЬТАТИ КЛАСИФІКАЦІЇ РУЙНУВАНЬ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ .....	47
4.1 Моніторинг результатів для окремих районів Маріуполя.....	48
4.1.1 Лівобережний район .....	49
4.1.2 Кальміуський район .....	50
4.1.3 Центральний район .....	52
4.1.4 Приморський район .....	53
4.2. Валідація та оцінка точності методів .....	54
4.3 Рекомендації для картографування та моделювання руйнувань .....	55
ВИСНОВОК.....	58
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	60
ДОДАТКИ.....	63

## ВСТУП

Маріуполь – місто в Україні на півдні Донецької області, на березі Азовського моря. Місто займає площу 166 км<sup>2</sup> (244 км<sup>2</sup> включаючи передмістя), 106 км<sup>2</sup> якої займає забудова. За даними перепису 2001 на території, підпорядкованій міській раді Маріуполя, мешкало 514 548 осіб, у тому числі в місті Маріуполь — 492 176 осіб [1].

Під час широкомасштабного вторгнення росії у лютому 2022 року, Маріуполь перебував у блокаді протягом двох місяців та зазнавав ударів артилерійськими, ракетними та бомбовими засобами, а у різних частинах міста велись інтенсивні вуличні бої. За даними The Economist [2] та UNOSAT [3], станом на середину 2022 року, 5647 будівель було пошкоджено з яких 315 було зруйновано, і це тільки дані по двом з чотирьох районів Маріуполя.



Рис.1 російський танк обстрілює багатоповерховий будинок у Кальміуському районі. Фото: Google Earth

За півтори роки повномасштабної війни, в мережі сформувалась велика база досліджень та статей на тему руйнувань міст України. Звичайні та інтерактивні карти дозволяють ознайомитися із масштабами наслідків війни використовуючи як загально доступні так і комерційні дані ДЗЗ.

На інтерактивному сайті [4], створеному японською командою на чолі з проф. Хіденорі Ватанаве Токійського Університету [5], можна ознайомитись із

руйнівними подіями впродовж війни включаючи такі міста як Ірпінь, Буча, Чернігів, Бахмут та Маріуполь. У цьому збірнику можна побачити знімки від Махаг Technologies, які фактично використовуються у Google Earth/Maps, а також дані Sentinel-1. Звісно, що передові, високоточні дані ДЗЗ небезкоштовні, проте, даних що доступні у відкритому доступі цілком достатньо для проведення досліджень в сфері аналізу руйнувань. Тому в Україні зараз існує можливість виконувати дослідження на тему війни та формувати масиви наукових праць для майбутніх поколінь. Дана робота є підтвердженням актуальності даної теми для України.

**Метою дослідження** є розробка методики ідентифікації та аналізу руйнувань в урбанізованих територіях на основі синтезу даних дистанційного зондування та алгоритмів машинного навчання. Дана методика апробується з метою покращення оперативності та точності оцінки шкоди внаслідок військових конфліктів.

**Об'єктом дослідження виступають** міські території, які зазнали руйнувань, з особливим фокусом на місто Маріуполь, що дозволяє оцінити рівень знищення інфраструктури та зміни у земельному покриві через воєнні дії.

**Предметом дослідження** є методи та технології дистанційного зондування землі (включаючи мультиспектральне сканування та радарні дані), а також алгоритми машинного навчання, які застосовуються для обробки та аналізу супутникових зображень.

**Основні завдання дослідження:**

1. Аналіз існуючих технік мультиспектрального сканування та радарного дистанційного зондування для виявлення руйнувань.
2. Розробка методології комбінування оптичних та радарних даних для підвищення точності класифікації забудованих територій.
3. Створення та навчання алгоритмів машинного навчання для аналізу супутникових зображень з метою ідентифікації змін забудови.
4. Проведення валідації розробленої методики з використанням історичних даних та забезпечення її ефективності для оперативного моніторингу.

5. Розробка рекомендацій для застосування розробленої методики у практичних цілях картографування та моделювання урбанізованих руйнувань.

У контексті моделювання міських руйнувань Маріуполя за допомогою дистанційного зондування та машинного навчання, **основні методи**, які були використані:

- Мультиспектральне сканування: використання даних супутників з мультиспектральними знімками для ідентифікації матеріальних складових та руйнувань.
- Радарне дистанційне зондування: застосування радарних зображень для виявлення структурних змін, незалежно від погодних умов та освітлення.
- Класифікація супутникових зображень: алгоритм керованої класифікації, для розрізнення пошкоджених та непошкоджених об'єктів.
- Машинне навчання: використання алгоритму Random Forest для аналізу даних та виявлення патернів.
- Алгоритми виявлення змін: порівняння знімків до та після подій для ідентифікації руйнувань.
- Сенсорне зливання: комбінування оптичних та радарних даних для підвищення точності інтерпретації.
- Індeksi вегетації та забудови: розрахунок спеціалізованого індексу, Normalized Difference Built-up Index (NDBI), для оцінки стану рослинності та міської інфраструктури.
- Геопросторова статистика: застосування статистичних методів для оцінки та інтерпретації руйнувань.
- Cloud Computing Platforms: використання хмарної платформи Google Earth Engine, для обробки великих обсягів даних.

**Практичне застосування даної роботи**, яка присвячена моделюванню міських руйнувань Маріуполя за допомогою дистанційного зондування та машинного навчання, може бути дуже широким та мультидисциплінарним. Швидке виявлення зон руйнування дозволяє керувати гуманітарними зусиллями та

надавати допомогу найбільш постраждалим районам. Використання аналізу даних для розробки стратегій відновлення інфраструктури та планування стійкого розвитку міст. Забезпечення даними для оцінки збитків та визначення страхових виплат. Надання владі достовірної інформації для підтримки прийняття рішень щодо виділення ресурсів та вжиття заходів реагування. Відстеження змін у землекористуванні та впливу урбаністичних процесів на довкілля. Розвиток та вдосконалення методологій дистанційного зондування та машинного навчання для застосування в інших областях. Підготовка матеріалів для інформування громадськості та міжнародних організацій про обсяги та характер руйнувань. Ці практичні застосування можуть мати значний вплив на різні сфери суспільного життя та допомогти у відновленні та подальшому розвитку постраждалих регіонів.

**Результатами цієї роботи будуть:**

- алгоритм виконання класифікації земної поверхні на мові JavaScript у веб-сервісі Google Earth Engine;
- карти результатів класифікації та аналізу змін;
- опис змін у інфраструктурі Маріуполя по його районам.

## Розділ 1

# ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЗМІН У ЗЕМЕЛЬНОМУ ПОКРИВІ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Виконав		Мічкін О.Д.			Моделювання міських руйнувань Маріуполя за допомогою дистанційного зондування та машинного навчання	Літ.	Арк.	Аркушів
.		Гебрин-Байди Л.В.					1	14
Керівник		Гебрин-Байди Л.В.				ІПО КНУБА, група ГСТ-22м		
Зав. каф.								

## 1.1 Переваги мультиспектрального сканування у виявленні руйнувань

Оптична зйомка – пасивний метод знімання який залежить від натурального освітлення поверхні сонцем, проте, якщо об’єкт спостереження випромінює достатньо енергії його можна зафіксувати і без сонячного світла (теплове та мікрохвильове випромінювання) [6].

Більшість електромагнітного випромінювання навколо нас спричинене відбиттям сонячного світла від поверхонь. Сонячна радіація може відбиватися, поглинатися, та розсіюватися атмосферою або об’єктами на Землі. Мультиспектральні сенсори можуть фіксувати цю енергію у видимому, ближньому і середньому інфрачервоному діапазонах.

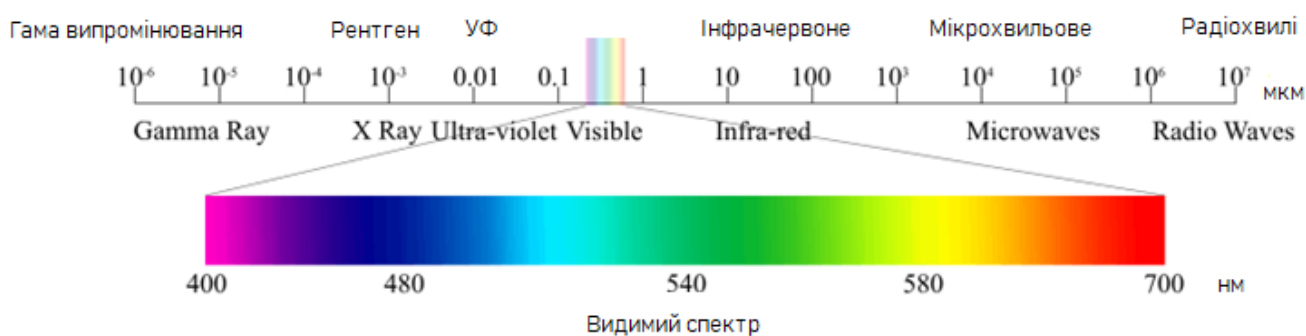


Рис.1.1 Електромагнітний спектр

Кожна поверхня на Землі відбиває та поглинає енергію по різному. Таким чином спектральні параметри об’єктів мають унікальні значення. Наприклад, здорова рослинність поглинає сині та червоні хвилі та відбиває зелені та інфрачервоні. (Рис.1.2).

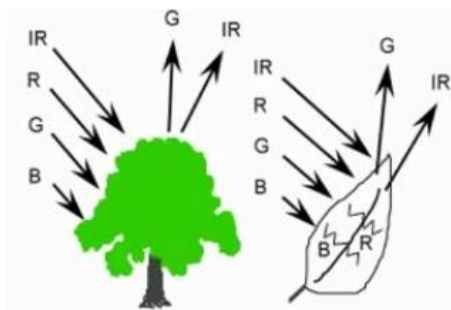


Рис.1.2 Відбивна здатність рослинності.

Джерело: NASA/Jeff Carns & Ginger Butcher

Гірські породи та ґрунти характеризуються збільшенням спектральної яскравості в сторону червоної зони електромагнітного спектру. Водні поверхні характеризуються монотонним зменшенням відбивної здатності від синьо-зеленої до червоної червоної зони спектра. Снігові поверхні та хмари має найбільш високі значення спектральної яскравості з зниженням у ближній інфрачервоній зоні, яке залежить від насиченості водою [7].

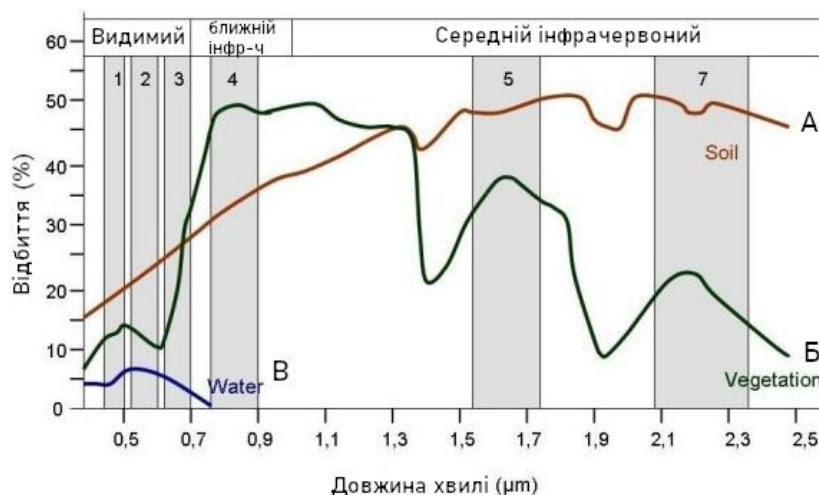


Рис.1.3 Спектральна яскравість гірських порід(A), рослинності(B) та води(B).

В мультиспектральних зображеннях спектральна яскравість поділяється на канали. На рисунку 1.3 позначені діапазони каналів Landsat 7, першим трьом діапазонам відповідають канали Синій (1), Зелений (2) та Червоний (3). Разом вони складають зображення в «справжньому» кольорі – RGB.(Рис.) Далі ідуть Ближній інфрачервоний або NIR (4) та Середній інфрачервоний SWIR (7).

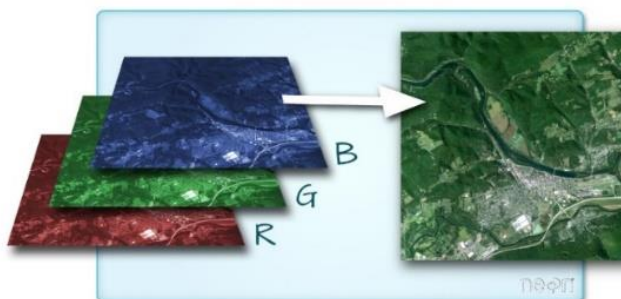


Рис.1.4 Поєднання шарів

Джерело: National Ecological Observatory Network (NEON)

Поєднання каналів або band stacking, це техніка створення мультиспектрального зображення із декількох одноканальних. Використовується для класифікації земної поверхні та розрахунку індексів NDVI, NDWI, NDBI та ін.

Системи сканування утилізують сенсори з миттєвим полем зору (IFOV), які сканують поверхню землі створюючи двовимірне зображення. Сканери з лінійною розгорткою (push-broom) широкого використовуються в оптичних супутниках, таких як Sentinel, Landsat.

В сканерах типу «push-broom» використовується ряд детекторів «A», які розміщені на фокальній площині «B» сформованої лінзою «C» (рис.1.5). Кожен індивідуальний детектор робить замір для однієї комірки «D», отже роздільна здатність отриманого знімку буде залежати від розміру та IFOV детекторів. Завдяки цій системі детектор має більше часу для виміру енергії з кожної комірки, це в свою чергу покращує радіометричну роздільну здатність [6].

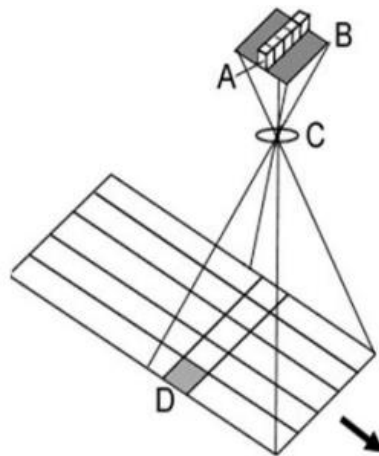


Рис.1.5 Сканер типу push-broom.

Джерело: R.Niwas Practical manual on Remote Sensing , GIS and Land Use Planning

Перший супутниковий знімок Землі був зроблений космічним апаратом «Explorer 6» (США) 14 серпня 1959 року на оптичний ТВ-сканер. В липні 1972 року на орбіту вийшов дослідницький апарат «Landsat 1» (США), мав в на борту чотирьохканальний мультиспектральний сканер з роздільною здатністю 80 метрів [8]. Сьогодні над Землею працюють такі супутники як Sentinel-2 та Landsat 7, які отримують зображення у більше ніж 10 каналах з роздільною здатністю від 15 до

60 метрів, а також комерційні супутники надвисокої роздільної здатності GeoEye, Pleiades, WorldView та SkySat дозволяють спостерігати за земною поверхнею у сантиметрових деталях.

13 січня 2022 року був запущений український штучний супутник землі «Січ-2-30» на ракеті носії «Falcon 9». Апарат оснащений чотирьохканальним сканером з роздільною здатністю до 7,8м.



Рис.1.6 «Січ-2-30» у лабораторії

## **1.2 Використання радарних даних для оцінки змін в урбанізованих територіях**

Електромагнітне випромінювання із довжиною хвилі в межах від 1 мм до 1 м називається - мікрохвильовим випромінюванням. Цей діапазон є дуже важливим для дистанційного зондування завдяки двом властивостям: Можливість мікрохвиль проникати крізь атмосферу при будь-яких погодних умовах та незалежність від освітлення сонцем; Відбиття мікрохвиль поверхнями не має співвідношення із видимим та тепловим спектром. Поверхні які виглядають нерівними у видимому спектрі насправді можуть бути гладкими [9].

Радар – це активна система знімання, яка випромінює імпульси мікрохвиль на поверхню спостереження. Відбите ехо приймається сенсором, який замірює час проходження та кількість енергії що повернулась (Рис.1.7). Коефіцієнт зворотного розсіювання ( $\sigma_0$ ) вираховується у децибелах (дБ).

$$\sigma_0 = 10 * \log_{10}(x) \quad (1.1)$$

де  $x$  – коефіцієнт енергії, який дорівнює відношенню кількості енергії яку отримав сенсор до відбитої ізотропної енергії.

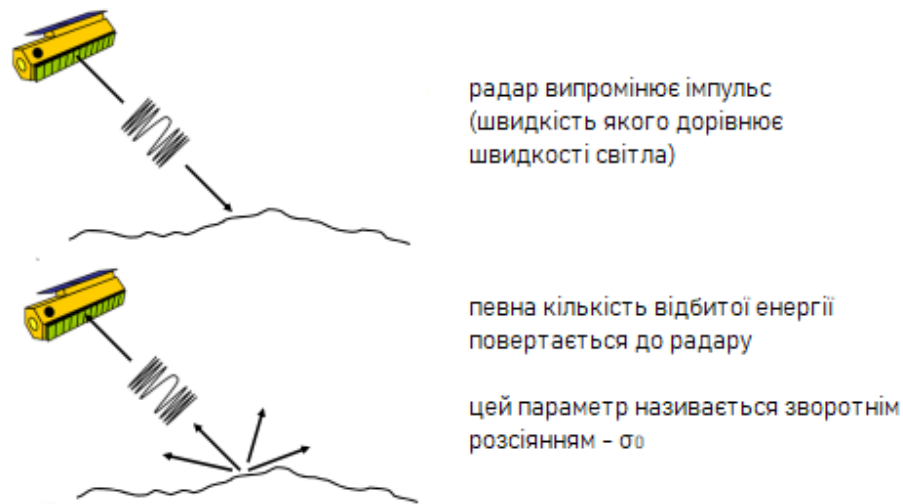


Рис.1.7 Принцип роботи радару

Джерело: A. Moreira. Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications.

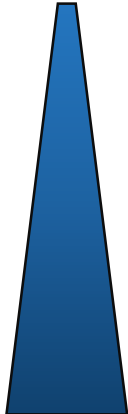



Табл.1.1

Коефіцієнт зворотного розсіювання $\sigma_0$ , дБ	Тип поверхні
-5 та більше	<b>Дуже шорстка поверхня.</b> Антропогенні об'єкти, будівлі, ухили земної поверхні в напрямку радару,
Від -10 до 0	<b>Шорстка поверхня.</b> Густа вегетація (ліси)
Від -20 до -10	<b>Поверхня середньої шорсткості.</b> Поля та низька рослинність
Нижче за -20	<b>Гладка поверхня.</b> Дороги, вода, суха земля (пісок)

Радаром можна виміряти такі параметри як відстань, кут нахилу, шорсткість та електропровідність поверхні. Тому довжина хвилі, кут нахилу та поляризація сигналу є важливими характеристиками[9]. Діапазон в якому працює радар

поділяють в залежності від довжини та частоти мікрохвилі яку антена може зафіксувати (Табл.). Низькочастотний діапазон використовуються для прийому сигналу на великих відстанях (радіотелескопи), в той час як високочастотні пристрої використовуються для зв'язку на коротких відстанях та у повсякденному житті. Сигнали з довжиною хвилі більше 4 см найменш сприятливі до атмосферних явищ, в тому числі водяної пари.

Табл. 1.2

Назва	Частотний діапазон (МГц)	Довжина хвилі (см)	Пропускна здатність	Чутливість до атмосферних явищ	Розмір антени
P	300 – 1000	30 – 100		Слабка	Велика
L	1000 – 2000	15 – 30			
S	2000 – 4000	7.5 – 15			
C	4000 – 8000	3.75 – 7.5			
X	8000 – 12000	2.5 – 3.75			
Ku	12000 – 18000	1.667 – 2.5			
K	18000 – 27000	1.111 – 1.667			
Ka	27000 - 40000	0.75 – 1.111	Більша	Сильна	Маленька

Радар з синтезованою апертурою (SAR) – використовує відносно малу антену, але завдяки просунутим методам отримання та обробки даних, система імітує можливості більшої антени [10]. Такий ефект досягається використанням руху супутника по орбіті для створення множини уявних радарів «А», «В» (Рис. 1.8). Така система ідеально підходить для літальних та космічних апаратів де є обмеження по розміру та масі апаратури яку на них можна встановити.

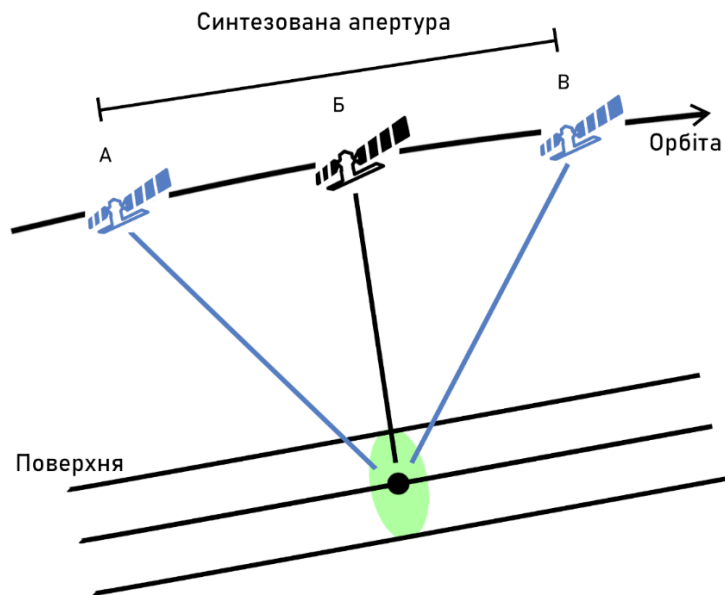


Рис.1.8 Концептуальна модель радару з синтезованою апертурою

Перший цивільний космічний апарат з SAR на борту «Seasat-1» був запущений NASA у 1978 році для дослідження океанів. Сьогодні SAR активно використовується супутниками Sentinel-1, RADARSAT, ALOS, TerraSAR-X, ANSARO-2 та ін. [11].

Поляризація електромагнітних хвиль характеризує геометричну площину, по якій вони коливаються. (рис. 1.9) Радарні системи із мультиполяризацією можуть передавати та приймати електромагнітні хвилі перпендикулярно (горизонтальна поляризація, H) або паралельно (вертикальна поляризація, V) до антени.

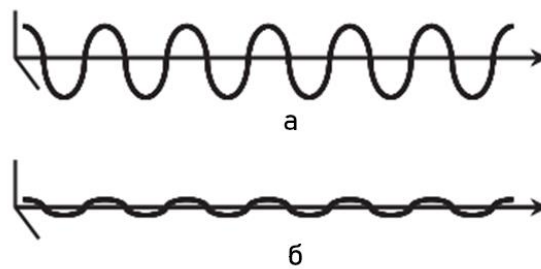


Рис.1.9 Поляризація випромінювання

а – вертикальна, б – горизонтальна

Джерело: Т.М. Lillesand - Remote Sensing and Image Interpretation

Об'єкти на землі та атмосфері можуть створювати свої унікальні поляризаційні сигнали. Ці сигнали можуть бути частково деполаризовані, через що виникає необхідність фіксувати як горизонтальну так і вертикальну поляризацію. Таким чином використовуються 4 комбінації:

1. VV: одинарна ко-поляризація, вертикальна передача/вертикальний прийом
2. HH: одинарна ко-поляризація, горизонтальна передача/горизонтальний прийом
3. VV+VH: дводіапазонна крос-поляризація, вертикальна передача/вертикальний прийом
4. HH+HV: дводіапазонна крос-поляризація, горизонтальна передача/горизонтальний прийом.

### **1.3 Методологія класифікації супутникових зображень**

Пікселі на оптичному знімку мають спектральні параметри. Певні значення цих параметрів (колір, яскравість) дає можливість припустити що зображено на знімку, матеріал або хімічний склад об'єкта. Якщо комбінація властивостей що характеризує один вид об'єкту або явища має закономірність, її можна використовувати для пошуку таких об'єктів на супутникових знімках застосовуючи алгоритми розпізнавання.

Класифікація – це процес ручного або автоматичного дешифрування знімків для виокремлення об'єктів, явищ і розподілу їх на окремі класи. Основними ознаками в процесі дешифрування знімку використовуються тон (яскравість) і текстура зображення. Кількість градацій тону залежить від якості бортової апаратури супутника. Текстура формується внаслідок різкої зміни яскравості окремих елементів зображення, розміри яких залежать від роздільної здатності апаратури супутника [12]. Пікселі зі схожими спектральними параметрами або яскравістю можна згрупувати в одну категорію.

Із розвитком цифрових технологій та виникненні потреб у більш точних даних та швидкому вирішенні географічних задач, виникли автоматизовані

алгоритми класифікації. Сьогодні такі алгоритми використовуються у широкому спектрі досліджень поверхні Землі. Існує 3 методи класифікації: керована (supervised), некерована (unsupervised) та об'єктно-орієнтовна.

Керована класифікація – це класифікація з навчанням, передбачає що фахівець заздалегідь знає кількість класів та їх загальні параметри та вказує їх у алгоритмі. Такими параметрами є набори пікселів які репрезентують певний клас. Класифікатор використовує ці навчальні дані аби класифікувати інші пікселі на зображенні. Деякі алгоритми можуть бути використані для керованої класифікації, до них входять розрахунки каналів за індексами NDVI, NDBI, NDWI, та інші методи такі як найбільша вірогідність (Maximum Likelihood), Метод опорних векторів (Support Vector Machines) та Дерева рішень, він же Метод випадкового лісу (Random Forest) [13].

#### **1.4 Технічні особливості супутників Sentinel-1 та Sentinel-2**

Sentinel-1A, 1B – це космічні апарати Європейського космічного агентства (ESA), оснащені радаром з синтезованою апертурою (SAR). Радарна зйомка виконується у С-діапазоні, це дозволяє отримувати дані при будь-якій погоді.

Дані отримані з цих космічних апаратів використовуються у:

1. Моніторингу розливу нафти
2. Картографуванні льодовиків
3. Моніторингу земних зсувів
4. Моніторингу за морськими суднами
5. Картографуванні лісів
6. Спостереження за стихійними лихами

Радар супутника з мультиполяризацією, здатен отримувати усі комбінації поляризаційних променів (HH, HV, VV+VH, HH+HV), та працює у чотирьох режимах зйомки (табл.1.3).

Табл. 1.3

Режим зйомки	Просторова роздільність (range x azimuth), м x м	Ширина полоси зйомки, км
Strip Map Mode	5 x 5	80
Interferometric Wide Swath	5 x 20	250
Extra-Wide Swath Mode	25 x 100	400
Wave-Mode	5 x 20	20 x 20

Sentinel-2A, 2B – це два космічні апарати ESA, оснащені мультиспектральним сенсором (MSI) для зйомки земної поверхні з роздільною здатністю від 10 до 60 м (табл.1.4). Тринадцять спектральних каналів у видимому ближньому інфрачервоному (SWIR) та короткохвильовому інфрачервоному спектрі (VNIR) гарантують відображення стану рослинності та змін у середовищі, а також зводить до мінімуму вплив атмосфери на якість даних [14].

Табл. 1.4

Назва каналу	Опис	Центральна Довжина хвилі (нм)	Роздільна здатність (м)
B1	Аерозолі	443	60
B2	Синій	492	10
B3	Зелений	559	10
B4	Червоний	665	10
B5	Вегетаційний червоний край	704	20
B6	Вегетаційний червоний край	740	20
B7	Вегетаційний червоний край	780	20
B8	NIR	832	10

B8A	Вузький NIR	864	20
B9	Водяна пара	944	60
B10	SWIR – Cirrus	1375	60
B11	SWIR	1612	20
B12	SWIR	2190	20

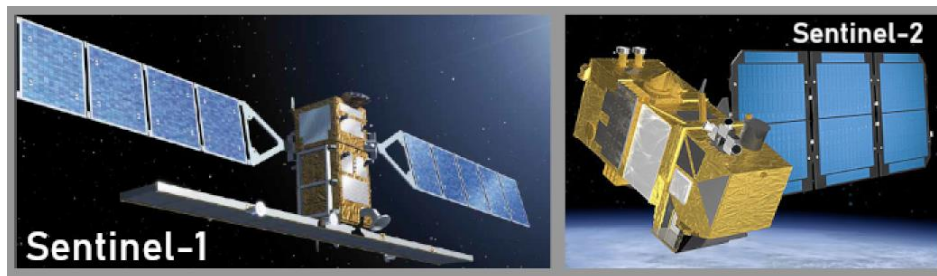


Рис.1.10 Космічні апарати Sentinel

Супутники працюють у тандемах, що дозволяє отримувати дані частіше та з різних ракурсів, по висхідній та низхідній орбіті.

Табл. 1.5

Супутник	Дата запуску	Інструмент	Висота орбіти	Періодичність зйомки
Sentinel-1A, 1B	03.04.2014 (1A) 26.04.2014 (1B)	«C-SAR»	693 км	1-3 дні
Sentinel-2A, 2B	23.06.2015 (2A) 07.03.2017 (2B)	«MSI»	786 км	10 днів

### 1.5 Аналітика можливостей хмарної платформи Google Earth Engine

Google Earth Engine – це онлайн-платформа, основана на хмарному доступі (cloud-based), для аналізу, візуалізації та обробки даних ДЗЗ. Основним інструментом є Code Editor, призначений для створення скриптів, він передбачає використання таких мов програмування як Java Script та Python. Цей сервіс має

велику кількість зручностей для користувача, тому за останні роки набув популярності у ГІС сфері.

По-перше, GEE має відкритий доступ через аккаунт Google. По-друге, усі обчислення виконуються на віддаленому сервері, це значно знижує вимоги до апаратного забезпечення користувача. По-третє, в сервісі присутній каталог із наборами даних до яких входять: Кліматичні, мультиспектральні, геофізичні та інші тематичні дані. У каталозі GEE доступні датасети місії Sentinel, Landsat та MODIS.

### 1.6 Структурний аналіз метаданих супутникових зображень

Колекція Sentinel-1 включає оброблені та калібровані GRD сцени, кожна з яких включає 3 види роздільної здатності (10, 25 або 40 метрів), комбінації чотирьох діапазонів (HH, HV, VV+VH, HH+HV) та трьох налаштувань інструменту IW (Interferometric Wide Swath), EW (Extra Wide Swath) та SM (Strip Map). До комбінацій поляризації надана таблиця із розмірністю значень (табл. 1.6)

Табл. 1.6

Назва	Одиниці виміру	Мінімальне значення	Максимальне значення	Розмір пікселя, м
HH	dB	-50	1	10
HV	dB	-50	1	10
VV	dB	-50	1	10
VH	dB	-50	1	10
angle	deg	0	90	20000

Дані Sentinel-1 які доступні в GEE не потребують обробки, бо вони вже були виконані. Попередня обробка сцен включає:

1. Видалення теплового шуму
2. Радіометричне калібрування

3. Корекція рельєфу місцевості з застосуванням Цифрових моделей висот - SRTM 30 або ASTER DEM. Кінцеві значення з поправкою на рельєф перераховуються у децибелі використовуючи логарифмічне масштабування ( $10 \cdot \log_{10}(x)$ ).

Колекція Sentinel 2 включає у себе 12 спектральних та 3 канали QA, один з яких представляє собою маску хмар. Знімки доступні з рівнем обробки Level-2A, це означає що знімки оброблені через програму «sen2cor», мають радіометричну та атмосферну корекцію.

Для користувачів сервісу GEE доступні таблиці зі змінними знімків. Ці змінні можна використовувати у програмному коді для вибірки знімків за датою, хмарністю та ін. (Табл 1.7) [14].

Табл. 1.7

Супутник	Назва	Тип даних	Опис
Sentinel-2	GENERATION_TIME	String	Дата зйомки у форматі YYYY-MM-DD
Sentinel-2	CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE	Double	Захмареність знімку у відсотках
Sentinel-1	resolution_meters	Double	Роздільна здатність у метрах
Sentinel-1	instrumentMode	String	Режим зйомки інструменту: [IW], [EW], [SM]
Sentinel-1	transmitterReceiverPolarisation	String_list	Тип поляризації: ['VV'], ['HH'], ['VV', 'VH'], ['HH', 'HV']

### 1.7 Висновки до першого розділу

Отже, у першому розділі були розглянуті базові принципи дистанційного зондування Землі за допомогою оптичного та радарного знімання, приладами мультиспектрального спостереження та радару з синтезованою апертурою. Визначена методологія використання даних супутникового спостереження для

фіксації змін на земній поверхні. Розглянуті засади керованої класифікації зображень за допомогою машинного навчання. Описані технічні особливості супутників Sentinel-1 та Sentinel-2, дані яких використовуються у дослідженні. Проаналізовані можливості хмарної платформи Google Earth Engine та структура матеданих зображень вище зазначених супутникових місій.

## Розділ 2

# ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ОПТИЧНИХ ТА РАДАРНИХ ДАНИХ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Виконав		Мічкін О.Д.			Моделювання міських руйнувань Маріуполя за допомогою дистанційного зондування та машинного навчання	Літ.	Арк.	Аркушів
.		Гебрин-Байди Л.В.					1	8
Керівник		Гебрин-Байди Л.В.				ІПО КНУБА, група ГСТ-22м		
Зав. каф.								

## 2.1 Застосування алгоритму Random Forest для класифікації знімків

Метод випадкового лісу (Random Forest) – це метод машинного навчання, який використовується для класифікації, регресії, кластерного аналізу тощо. У аналізі даних дистанційного зондування метод випадкового лісу проявляє себе як точний інструмент класифікації.

Основа методу – дерева рішень, полягає у розбитті множин можливих значень вектору ознак (незалежних змінних) на множини, які не перетинаються і підгонці простої моделі для кожної такої множини. Отже, мета цього методу полягає в тому, щоб створити модель, яка прогнозує значення цільової змінної на основі декількох змінних на вході [15].

Цей принцип розглянемо на простому прикладі. Потрібно визначити який клас земель зображено на зразку. (Рис. 2.1) Визначаємо що є n-класів, нехай два за яких забудова та зелені насадження, також відомі параметри (колір) яким відповідають ці класи. На основі рішень до яких прийшли дерева, створиться n-класів, кожен з яких має свою вагу. Шляхом голосування, алгоритм прийде до висновку що на растрі переважає забудова.

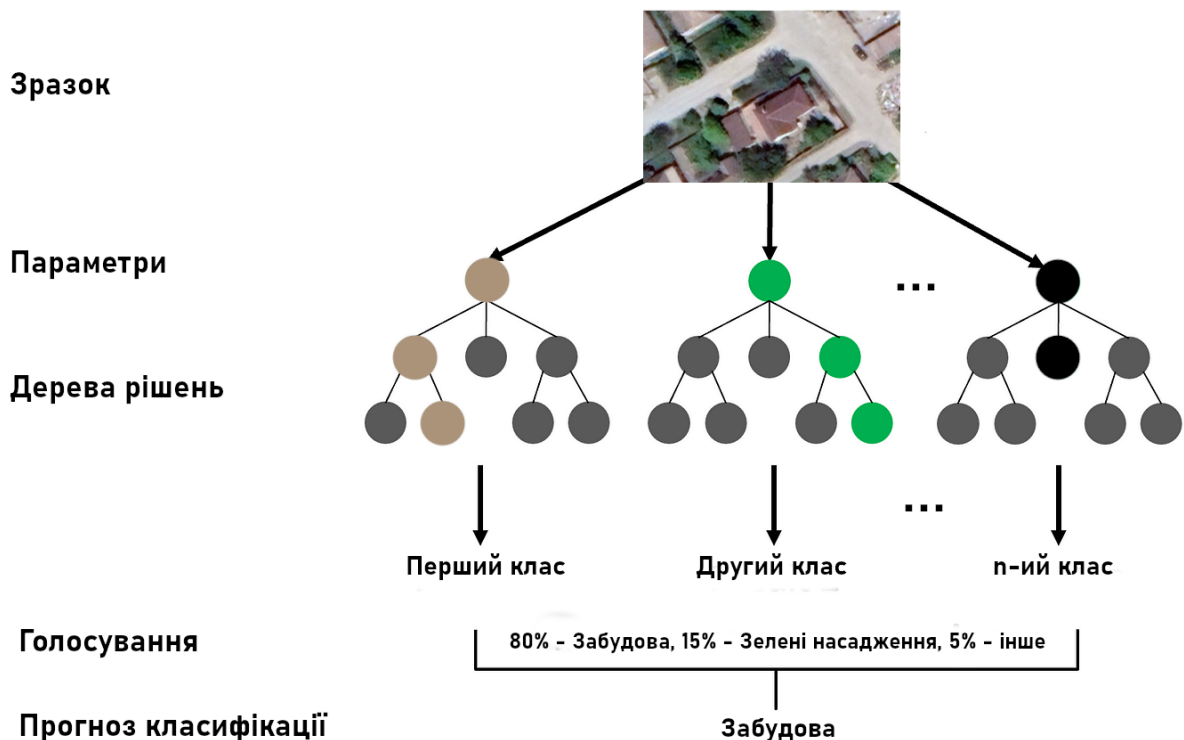


Рис.2.1 Принцип алгоритму Random Forest

Перевагами алгоритму випадкових лісів є ефективність обробки даних із великою кількістю ознак, нечутливість до масштабування даних, багатопоточність, відсутність проблеми перенавчання та простота застосування [16].

## **2.2 Візуальний аналіз руйнувань за допомогою Google Earth**

Використовуючи застосунок Google Earth, був проведений візуальний аналіз житлових масивів та кварталів Маріуполя на елементи руйнувань (рис. 2.2):

1. одно- двоповерхові будинки які були пошкоджені мають характерний зовнішній вигляд, а саме: стіни які залишились після знищення даху утворюють прямокутні або багатокутні фігури, які добре видно на знімках Google Earth.
2. при повному руйнуванні будинку на її місці залишається матеріал яскравого пісочного-сірого кольору.
3. багатоповерхові будинки які були пошкоджені здебільшого мають фасади покриті сажею через масштабні пожежі, мають відмітини від влучань на даху та будівельний матеріал що розкинутий по периметру, такі будинки можна відновити
4. при важкому руйнуванні багатоповерхівки видно відсутні балкони, секції та зруйновані під'їзди, такі будинки здебільшого не підлягають відновленню
5. при повному руйнуванні багатоповерхівки на її місці залишається велика кількість матеріалу.

Масштаби руйнувань в місті досить великі. Більшість поодиноких руйнувань спричинені внаслідок біглого вогню ракетними та артилерійськими засобами по місту. Деякі частини міста, особливо на околицях, були прицільно зруйновані. Інтенсивні бої, які проходили ближче до «Азовсталі», призвели до найбільших руйнувань які можна рахувати кварталами.



Рис.2.2 Види руйнувань

### 2.3 Методи виявлення змін на основі супутникових знімків

При порівнянні знімків на великий проміжок часу цілком можливо зафіксувати зміни навіть неозброєним оком. На звичайних знімках можна ідентифікувати зміни у кольорі або текстурі поверхні. В даних радарного спостереження зміни характеризуються градацією інтенсивності зворотного розсіювання. Вони можуть бути спровоковані різкою зміною структури поверхні, або появою нових об'єктів.

Як відомо, об'єкти на поверхні мають унікальні для себе відбивні здатності. Цю особливість можна чітко фіксувати за допомогою радару. Так як будівлі в загальному випадку геометрично незмінні, вони будуть мати відносно сталий мікрохвильовий слід впродовж довгого спостереження. Якщо ж геометричні властивості будинку змінюються (ушкодження або знищення), то і слід буде іншим. На рисунку 2.3 залізничних депо в промисловій зоні, можна наглядно побачити зміни у зворотному розсіюванні в місцях де був пошкоджений дах (б-2). Характер відбиття мікрохвиль змінився і ефект зворотного розсіювання став більш інтенсивним. (а-2).

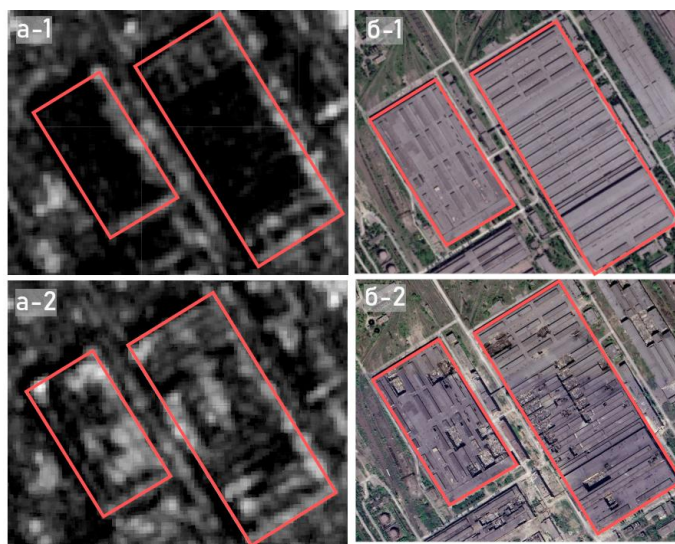


Рис 2.3 Зміни у зворотному розсіюванні при пошкодженні індустриальних споруд

Проте, зміни у структурі об'єктів можуть і навпаки приводити до зменшення інтенсивності зворотного розсіювання. Наприклад, одно- двоповерхові житлові квартали на перехресті просп. 1-го Травня та вул. Сергія Лазо в Маріуполі, повністю знищені внаслідок бойових дій. На рисунках до війни (а-1, б-1) можна чітко виокремити три квартали. На рис. (б-2) кидається в очі що більшість будинків залишились стояти у вигляді стінових каркасів або зовсім знищені під фундамент. Через відсутність покрівлі будинків поверхня стала рівнішою, і частина мікрохвиль вже не відбивалася від дахів і не поверталась до сенсору. На знімку цей район став помітно тускліше, а проміжки між кварталами стали менш чіткими (а-2).

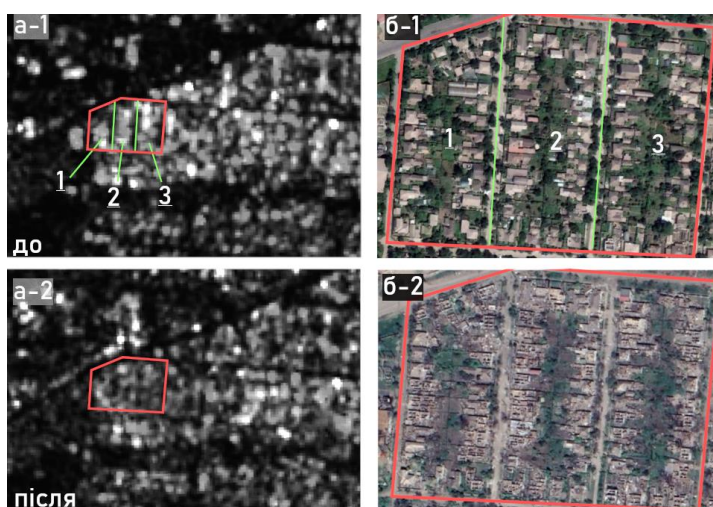


Рис. 2.4 Зміни у зворотному розсіюванні при пошкодженні малоповерхової забудови

Такі ефекти вже були досліджені [17] при оцінці пошкоджень у місті Київ за допомогою тих же самих даних Sentinel-1. На знімках (a-1, a-2) вціліла будівля не змінила свою відбивну здатність, в той час як знищена під фундамент (b-3) практично пропала з радару (b-1,b-2), а частково зруйнована (c-3) має інший, більш яскравіший слід (c-1, c-2). На рисунках (a,b,c) візуалізовано характер відбиття мікрохвиль.

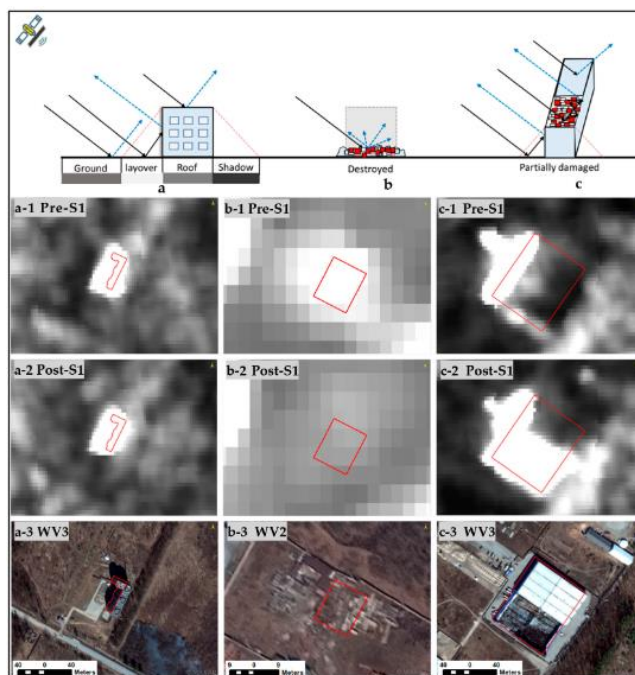


Рис. 2.5 Ефекти розсіювання від різних ушкодженнях  
 Джерело: Aimaiti Y. War Related Building Damage Assessment in Kyiv,  
 Ukraine, Using Sentinel-1 Radar and Sentinel-2 Optical Images

В ході цього дослідження виділено наступні наземні фактори які сприяють помітній зміні інтенсивності розсіювання при порівнянні знімків різного часу:

- Збільшують:
  1. Нові забудови та об'єкти, там де їх раніше не було, важкі транспортні засоби (залізничні вагони, кораблі та ін.);
  2. Осушення водойм
- Зменшують:
  1. Відсутність забудов та об'єктів, там де вони раніше були;
  2. Затоплення місцевості;

## 2.4 Інтеграція оптичних та радарних даних для підвищення точності аналізу

У цій роботі були поєднані методи класифікації земного покриття використовуючи радарні та оптичні дані. Поєднання двох типів даних дає можливість використовувати позитивні якості обох сторін:

- Покращення класифікації земного покриття
- Отримання детальної характеристики поверхні
- Чіткіше відокремлення спектральних класів (оптичні)
- Інформація про шорсткість поверхні (радарні)

При класифікації може виникнути ситуація, коли спектральні значення суттєво різних поверхонь співпадають. Це призводить до помилкової класифікації, яку буде проблематично обійти. Через обмеження у роздільній здатності або інших факторів кольори будуть спотворюватися та імітувати інші класи. Маріуполь – це місто з важкою металургічною промисловістю, викиди з підприємств акумулюються на дахах будинків (рис. 2.6) спотворюючи їх колір, який спостерігається з супутника. Таким чином, є можливість що відкритий ґрунт буде класифікований як забудова або навпаки.

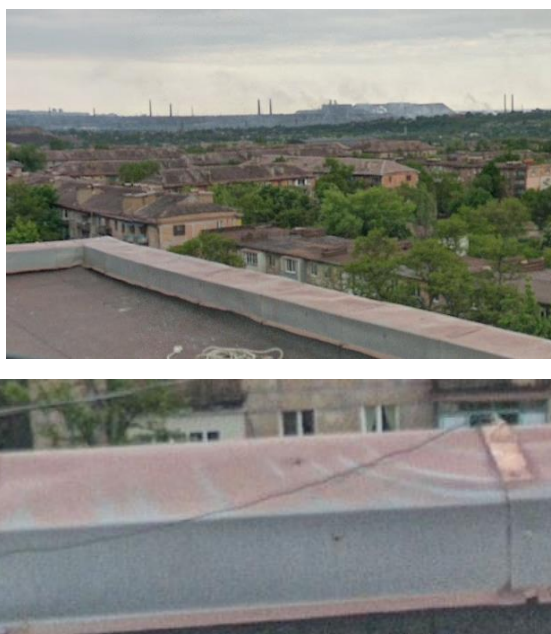


Рис. 2.6 Панорама Маріуполя та осадилу

На рисунку 2.7 наведений приклад того як поєднання двох типів даних впливає на точність класифікації. На фрагменті 2021 року (а) східний район

Маріуполя, на околицях зосереджені багатоповерхові житлові масиви, західніше – садибна забудова. В правій нижній частині карти (b) можна помітити хибну класифікацію поверхні ґрунту яка як і дороги класифіковані як забудова. При поєднанні з радарним знімком (c) створюється помітно краща картина (d). Хибно класифікований ґрунтовий покрив зник, так як забудова в більшості випадків має яскравішу сигнатуру на радарі. Таким же чином дороги зникли з класу забудов, бо вони мають низьку радарну сигнатуру. Присадибна забудова стала більш однорідною.

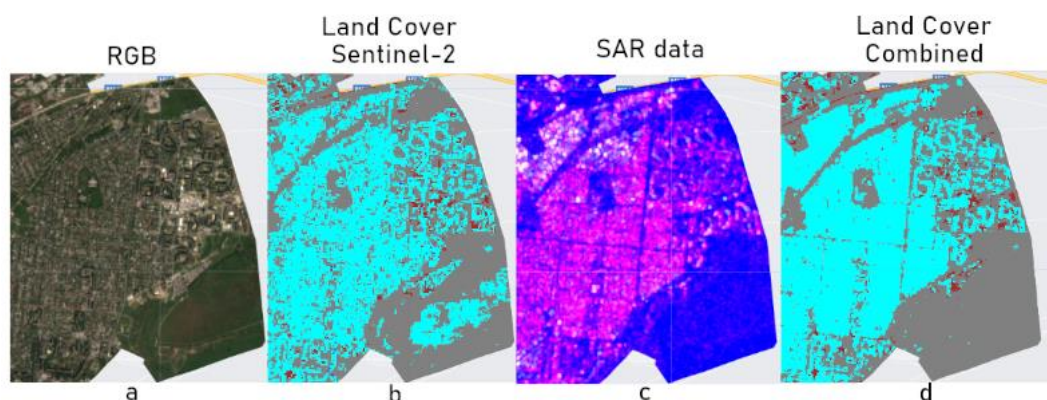


Рис. 2.7 Покращення класифікації радарними даними

Отже, поєднання спектральних та мікрохвильових відбивних здатностей поверхонь дуже позитивно впливає на точність класифікації земного покриття в урбанізованих регіонах.

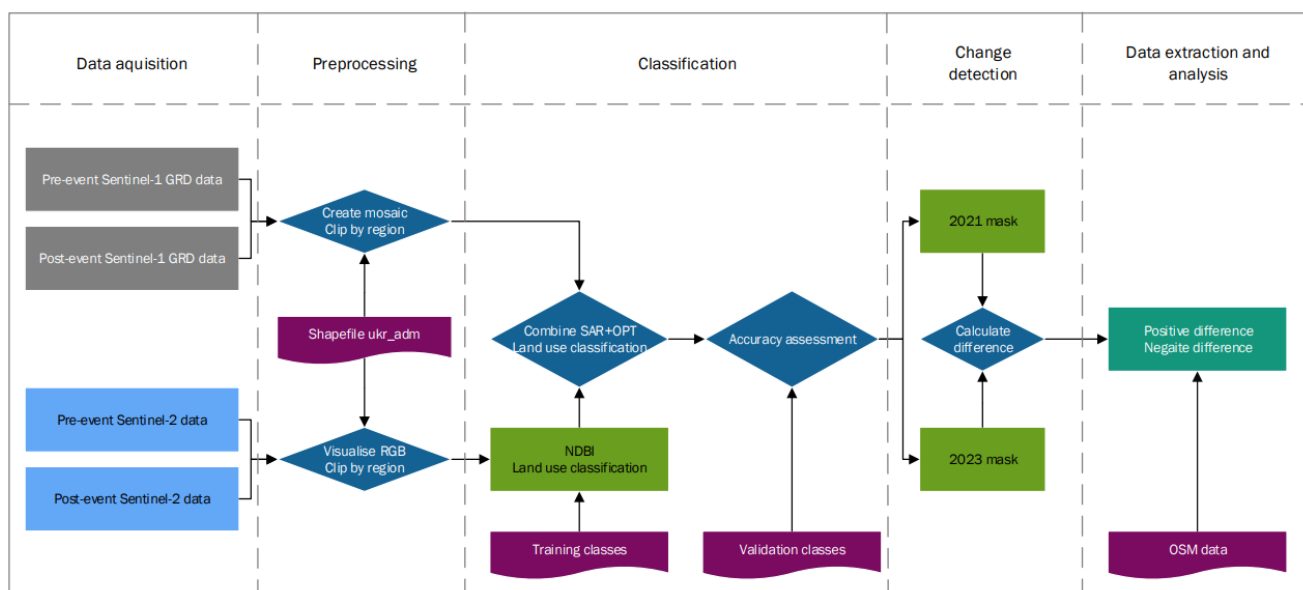


Рис. 2.8 Концептуальна схема алгоритму комбінованої класифікації

## **2.5. Висновки до другого розділу**

Отже, у другому розділі розглянуті переваги застосування алгоритму машинного навчання Random Forest для класифікації земного покриву. Виконаний візуальний аналіз міста по оновленим даним Google Earth на травень 2022 року, для отримання уявлення про масштаби руйнувань. Обґрунтований вибір методів класифікації даних, який буде включати у себе інтеграцію оптичних та радарних даних для підвищення точності аналізу. Створена концептуальна схема алгоритму комбінованої класифікації

### Розділ 3

## РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ В GOOGLE EARTH ENGINE ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗМІН В ЗАБУДОВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ МАРІУПОЛЯ

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Мічкін О.Д.			Моделювання міських руйнувань Маріуполя за допомогою дистанційного зондування та машинного навчання	Літ.	Арк.	Аркушів
.		Гебрин-Байди Л.В.					1	10
Керівник		Гебрин-Байди Л.В.				ІПО КНУБА, група ГСТ-22м		
Зав. каф.								

### 3.1 Географічна та урбаністична характеристика Маріуполя

Дослідження сфокусоване на місті Маріуполь, розташованого на півдні Донецької області на узбережжі Азовського моря. Прямокутні області на рисунку 3.1 показують охват використаних супутникових знімків.

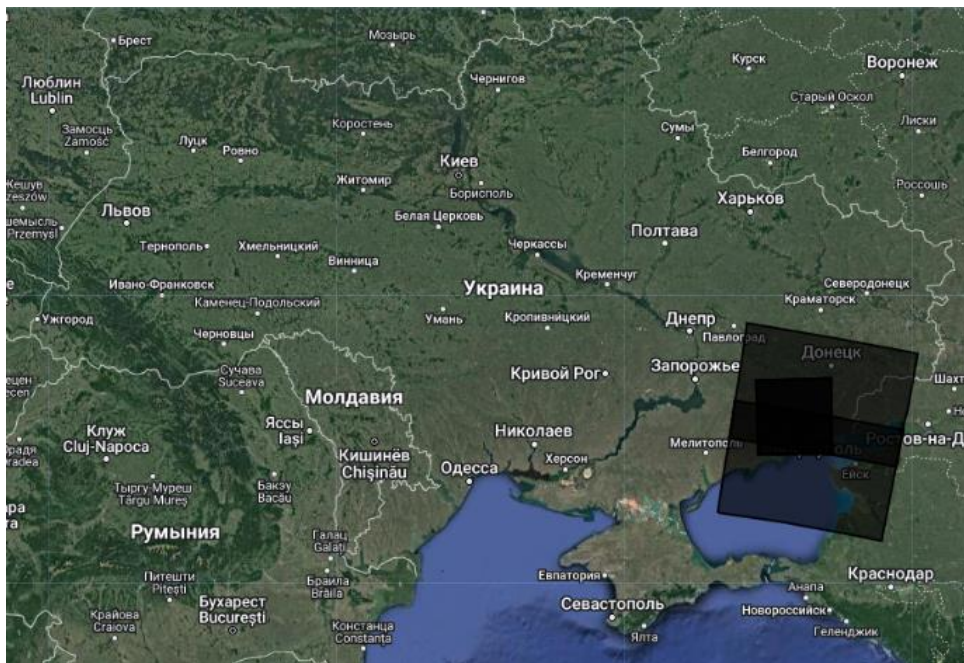


Рис.3.1 Зона дослідження

Межі міста отримаємо з .shp файлу адміністративних меж України ‘ukr\_cities’, попередньо доданого у хмарне сховище проекту під назвою змінної ‘table’, використовуючи код:

```
var region = table.filter(ee.Filter.eq('ADM4_EN', "Mariupol"))
```

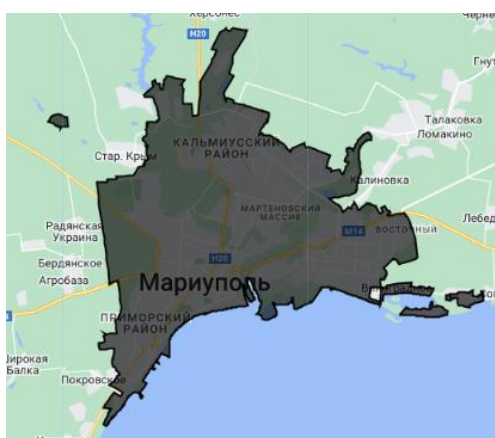


Рис. 3.2 Межі міста Маріуполь

### 3.2 Підготовка даних супутників Sentinel-1 та Sentinel-2

Для порівняльного аналізу вибрані знімки Sentinel 1 у осінній час, коли вже не така густа рослинність але ще відсутній сніжний покрив, з низхідної орбіти та типом поляризації VV та VH. В результаті вибірки були доступні знімки на дати 2021.11.16 та 2023.10.25. Загальний інтервал становить 708 днів.

Табл. 3.1 Метадані знімків Sentinel-1

Знімок	Метадані знімку
2021.11.16	<pre> Image COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20211116T033958_20211116T034023_040591_04D0A8_EAB9 (3 bands) type: Image id: COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20211116T033958_20211116T034023_040591_04D0A8_EAB9 version: 1699626457740360 bands: List (3 elements) 0: "VV", double, EPSG:32637, 29151x21629 px 1: "VH", double, EPSG:32637, 29151x21629 px 2: "angle", float, EPSG:32637, 21x10 px properties: Object (54 properties) </pre>
2023.10.25	<pre> Image id: COPERNICUS/S1_GRD/S1A_IW_GRDH_1SDV_20231025T034026_20231025T034051_050916_062340_A408 version: 1699626457740360 bands: List (3 elements) 0: "VV", double, EPSG:32637, 29144x21699 px 1: "VH", double, EPSG:32637, 29144x21699 px 2: "angle", float, EPSG:32637, 21x10 px properties: Object (55 properties) </pre>

Із каталогу Sentinel-1 зображення отриманні із застосуванням функції фільтрування (додаток 1):

- за датами
- видом орбіти
- кількістю каналів
- методом зйомки
- роздільною здатністю

Мультиспектральні знімки Sentinel-2 застосовуються перш за все для керованої класифікації земної поверхні, а саме NDBI. З цією метою вибрані знімки у літній період часу, коли зелені насадження сильніше контрастують на фоні забудов. Також, у літній період кількість безхмарних днів більша, що полегшує підбір знімків. В результаті було обрано знімки на такі дати: 2021.07.27 та 2023.07.17. Загальний інтервал 720 днів. Знімки Sentinel-2 вибирались на сайті sentinel-hub [18] через веб-застосунок «EO Browser». Це значно спростило відбір знімків, завдяки зручному інтерфейсу та можливості візуалізації. Після чого обрані знімки були завантажені із каталогу GEE за їх 'id'.

Табл. 3.2 Метадані знімків Sentinel-2

Знімок	Метадані
2021.07.27	<pre> Image COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210727T082609_20210727T083512_T37TCN (23 bands) type: Image id: COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210727T082609_20210727T083512_T37TCN version: 1699460706238220 bands: List (23 elements) properties: Object (81 properties) CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE: 0.128125                     </pre>

2023.07.17	<pre> Image COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20230707T082609_20230707T082800_T37TCN (23 bands)   type:   Image   id:   COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20230707T082609_20230707T082800_T37TCN   version:   1699630074561381   bands:   List (23 elements)   properties:   Object (101 properties)   CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE:   1.699138 </pre>
------------	---

Дані Sentinel 1 та Sentinel 2 отримані через каталог GEE вже попередньо оброблені, тому залишається тільки візуалізувати зображення по відповідним каналам та обрізати до зони дослідження.

Для радарних даних, з двох каналів VV та VH утворюємо мозаїчне зображення

```
var preprocessed = sar_2021.mosaic();
```

Функцією `.clip` обрізаємо отримане зображення під межі досліджуваного регіону.

```
var composite = preprocessed.clip(region);
```

Обробка мультиспектральних знімків включає у себе налаштування каналів RGB, для коректної візуалізації кольорового зображення. Канали B4, B3 та B2 відповідно червоний, зелений та синій.

```
var rgbVis_before = {
  min: 0.0,
  max: 3000,
  bands: ['B4', 'B3', 'B2']
};
```

### 3.3 Створення набору даних для тренування та валідації моделей

Тренувальні класи необхідні для навчання класифікатора розрізняти пікселі та відносити їх до правильних класів. Загалом, чим більше точок тим краще буде результат. Не дивлячись на те що нас цікавить лише забудова, рекомендується [19] визначити більшу кількість класів, це сприяє кращому тренуванню класифікатора та поліпшенню результатів.

Валідаційні класи – виступають незалежно від тренувальних та використовуються для оцінки точності класифікації. Відношення тренувальних до валідаційних повинно бути 70 на 30.

Табл.3.3

Класи	Назва	'landcover'	Кількість точок	Кількість полігонів
Тренувальні	Urban	1	86	6
	Vegetation	2	74	10
	Water	3	46	2
	Bare	4	38	2
Валідаційні	Urban_v	1	33	1
	Vegetation_v	2	32	-
	Water_v	3	20	-
	Bare_v	4	13	-

Для створення класів у GEE потрібно створити набір даних (Feature Collection). В параметрах класу вказуємо 'landcover' та його значення (рис.3.3)

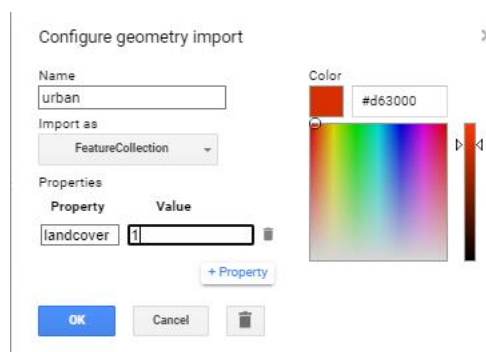


Рис. 3.3 Вікно створення класів в GEE

Точки на місцевості обираються з відповідністю до класу який визначається. Також можна використовувати полігони. Бажано вибирати незмінні протягом часу поверхні, наприклад будівлі які вціліли, поля які не були забудовані тощо.

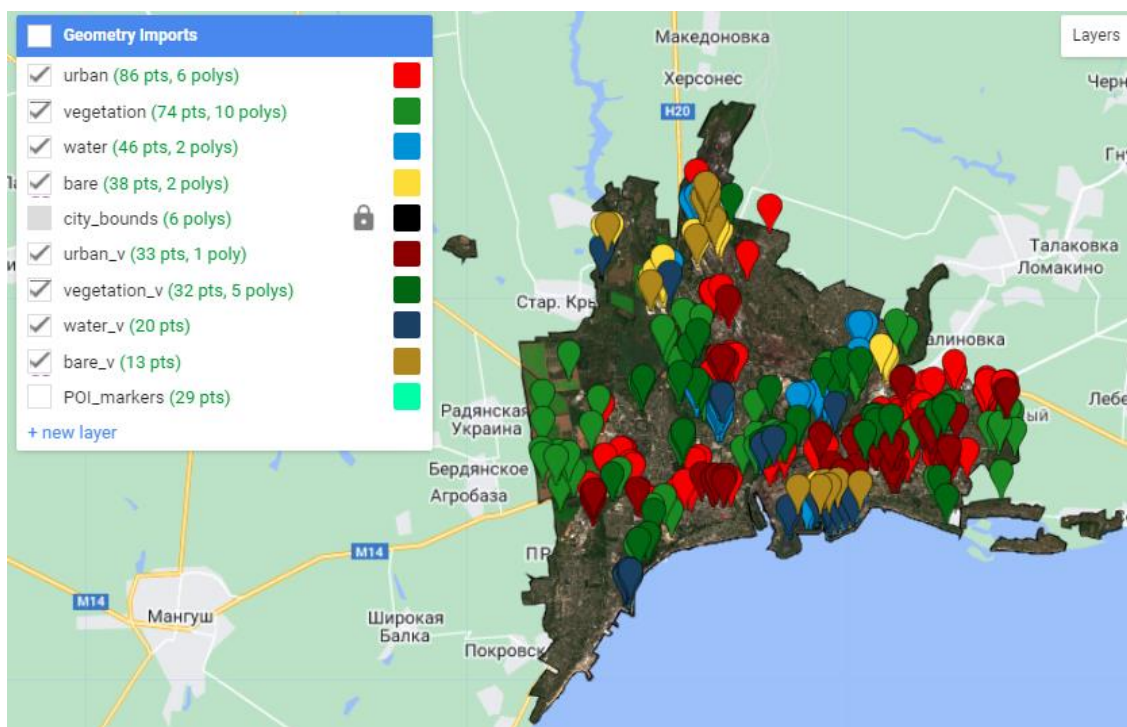


Рис. 3.4 Тренувальні та валідаційні класи

### 3.4 Класифікація забудованих ділянок застосовуючи індекс NDBI та інтеграції оптичних даних із радарними

Керована класифікація мультиспектральних знімків була виконана у п'ять етапів. На першому етапі розраховується індекс Normalized Difference Build-up Index (формула 3.1) за двома каналами: коротхвильового інфрачервоного B11 (SWIR1) та ближнього інфрачервоного B8 (NIR).

```
var ndbi = image.normalizedDifference(['B11',
'B8']).rename('NDBI');
```

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} \quad (3.1)$$

На другому етапі, індексоване зображення поєднується із мультиспектральним за допомогою функції .cat, таким чином до останнього буде доданий канал 'NDBI'. Нове зображення буде мати назву 'ndbicompr'.

```
var ndbicmp = ee.Image.cat(image, ndbi)
```

Далі виконується тренування, яке створить зв'язок між спектральними параметрами обраних тренувальних пікселів на скомпонованому зображенні та заданим значенням класів 'landcover'. Третій етап виконано. На четвертому етапі виконується тренування класифікатора 'classifierS2', який буде представляти собою 50 дерев випадкових рішень Random Forest. П'ятий, останній етап, виконується класифікація скомпонованого зображення 'ndbicmp' класифікатором 'classifierS2' в результаті чого отримаємо фінальне зображення з класами земель 'classifiedS2'.

Код тренування та класифікації мультиспектральних знімків виглядає наступним чином:

```
var bandsS2 = ['B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8', 'NDBI'];
var trainS2 = ndbicmp.select(bandsS2).sampleRegions({
  collection: features,
  properties: ['landcover'],
  scale:10
});
var classifierS2 = ee.Classifier.smileRandomForest(50).train({
  features: trainS2,
  classProperty: 'landcover',
  inputProperties: bandsS2
});
var classifiedS2 =
ndbicmp.select(bandsS2).classify(classifierS2);
```

Інтеграція мультиспектральних даних та радарних виконується за аналогічним принципом, який використовувався для поєднання NDBI та мультиспектрального зображення. Використовується функція .cat для зображень 'ndbicmp' та 'composite'.

```
var opt_sar = ee.Image.cat(ndbicmp, composite);
```

Створення набору тренувальних даних 'training\_opt\_sar' для усіх каналів 'bands\_opt\_sar', та тренування класифікатора Random Forest 'classifier\_opt\_sar'

```
var bands_opt_sar =  
['VH', 'VV', 'B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8', 'NDBI'];  
var training_opt_sar =  
opt_sar.select(bands_opt_sar).sampleRegions({  
  collection: features,  
  properties: ['landcover'],  
  scale:10  
});  
var classifier_opt_sar =  
ee.Classifier.smileRandomForest(50).train({  
  features: training_opt_sar,  
  classProperty: 'landcover',  
  inputProperties: bands_opt_sar  
});
```

Виконання класифікації комбінованих зображень

```
var classifiedboth =  
opt_sar.select(bands_opt_sar).classify(classifier_opt_sar);
```

### 3.5 Статистичний аналіз змін у забудові

На основі розрахованих растрів були створені карти класифікації земельного покриття (додаток 5-8). За допомогою програмного коду було також виведені площі класів у гектарах (табл. 3.4, 3.5).

Порівнюючи два методи, відмічається, що зміна у класах водних об'єктів та гірських порід дуже близька один до одного. Проте, різниці площ забудов та вегетації дуже відрізняються один від одного. Можна сказати що завдяки урахуванню характеристик зворотного розсіювання, багато пікселів було перекласифіковано. Тому дійсно, поєднання двох методів позитивно вплинуло на точність класифікації.

Табл. 3.4 Sentinel-2

Клас	Площа на 2021, га	Площа на 2023, га	Різниця, га
urban	7703,4	6386,3	- 1317,1 (- 17,1 %)
vegetation	7335,8	8496,5	+ 1160,7 (+ 15,8 %)
water	164,7	85,2	- 79,5 (- 48,2 %)
bare	1176,2	1412,1	+ 235,9 (+ 20,1 %)

Табл. 3.5 Sentinel-1 + Sentinel-2

Клас	Площа на 2021, га	Площа на 2023, га	Різниця, га
urban	6621,4	6806,1	+ 184,7 (+ 2,8 %)
vegetation	8412,7	8059,6	- 353,1 (- 4,2 %)
water	153,9	91,2	- 62,7 (- 40,7 %)
bare	1192,0	1423,2	+ 231,2 (+ 19,4 %)

Розрахунок різниці між двома часовими проміжками виконується для класу забудов, він визначений як 'classification' = '1'. Створюється дві маски забудованої території, а потім виконується різниця між ними функцією .subtract.

```

var so_buildup_mask_2021 =
classifiedboth_2021.select('classification').eq(1)
var so_buildup_mask_2022 =
classifiedboth_2022.select('classification').eq(1)

var so_diff =
so_buildup_mask_2021.subtract(so_buildup_mask_2022)
Map.addLayer (so_diff,{min: -1, max: 1, palette: ['red',
'black','yellow']}, 'so_diff')
Map.addLayer (so_diff,{min: -1, max: 0, palette:
['red','black']}, 'positive',false)
Map.addLayer (so_diff,{min: 0, max: 1, palette:
['black','yellow']}, 'negative',false)

```

### 3.6. Висновки до третього розділу

У третьому розділі були обрані вихідні знімки на дворічний проміжок часу з 2021 по 2023 та представлені їх метадані. У Google Earth Engine був написаний код на мові JavaScript для автоматичної класифікації земного покриття та аналізу змін в інфраструктурі міста. Вибрані тренувальні та валідаційні точки для чотирьох класів: забудови, вегетації, водойм та відкритого ґрунту/піску. Код алгоритму включає у себе такі етапи:

- Підбір знімків за визначеними параметрами та їх підготовка
- Розрахунок індексу NDBI та класифікація земного покриття за оптичними даними.
- Інтеграція оптичних та радарних даних
- Статистичний аналіз площ за результатами класифікації
- Оцінка точності застосовуючи матрицю похибок та статистичного значення каппа.
- Розрахунок різниці у класі забудов
- Експорт зображень.

## Розділ 4

# РЕЗУЛЬТАТИ КЛАСИФІКАЦІЇ РУЙНУВАНЬ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

					ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Мічкін О.Д.			Моделювання міських руйнувань Маріуполя за допомогою дистанційного зондування та машинного навчання	Літ.	Арк.	Аркушів
.		Гебрин-Байди Л.В.					1	10
Керівник		Гебрин-Байди Л.В.				ІПО КНУБА, група ГСТ-22м		
Зав. каф.								

#### 4.1 Моніторинг результатів для окремих районів Маріуполя

Створені у GEE растри були експортовані на персональний комп'ютер для подальшого аналізу у ГІС-середовищі. Далі робота із даними буде проводитись у QGIS.

На карті Маріуполя (рис.4.1) показані позитивні та негативні значення відмінностей. Всього було зафіксовано 82894 окремих змін, (45965 позитивних значень, 41647 негативних значень) на сумарну площу 2326,2 га. Зміни поза індустріальними зонами становлять: 681 га – негативних, 917 га – позитивних.

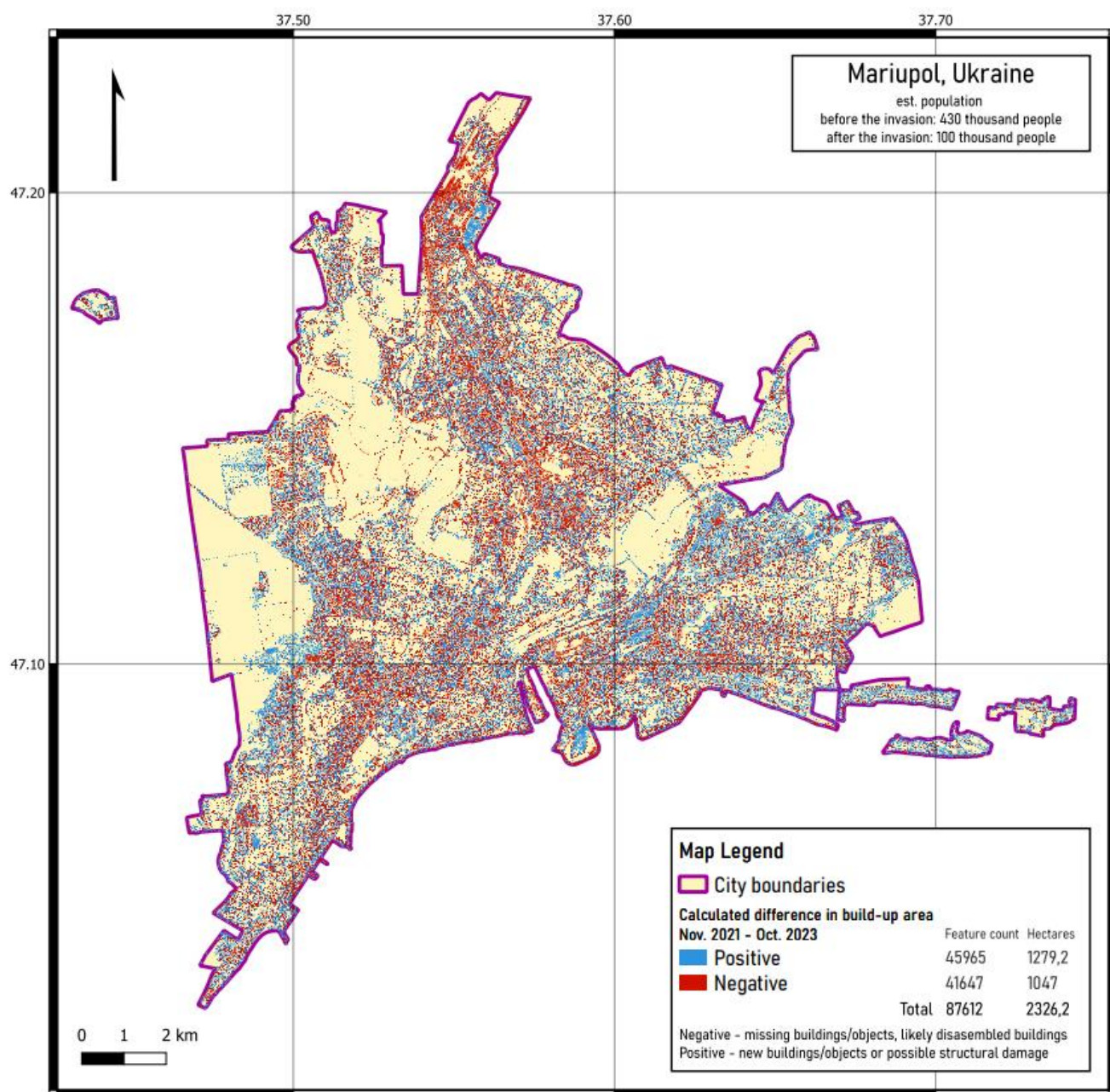


Рис. 4.1 Карта розрахованих змін

Позитивні значення показують що інтенсивність відбиття мікрохвиль в цих місцях вища ніж у 2021 році. Це може означати декілька речей: поява нових об'єктів та забудов, зміна структури об'єкту, яка особливо яскраво помітна на промислових будівлях (цехах, складах). Впродовж часу окупаційна влада активно демонтує багатоповерхові будинки, які не придатні до ремонту. Різке «зникнення» цілих кварталів дуже помітне практично в усіх районах міста. Знесений будинок на карті відображається як інтенсивний слід який повторює форму знесеної частини (рис.4.2 а)

Негативні значення показують що інтенсивність відбиття мікрохвиль стала нижчою або клас об'єкту змінився з житлової забудови на інший. Негативні значення також означають відсутність об'єктів або транспортних засобів як наприклад вагони, вантажівки, автобуси. Нові об'єкти можна виявити порівнюючи шар відмінностей із даними OSM, які на момент проведення дослідження ще не були актуалізовані. (рис.4.2 б)

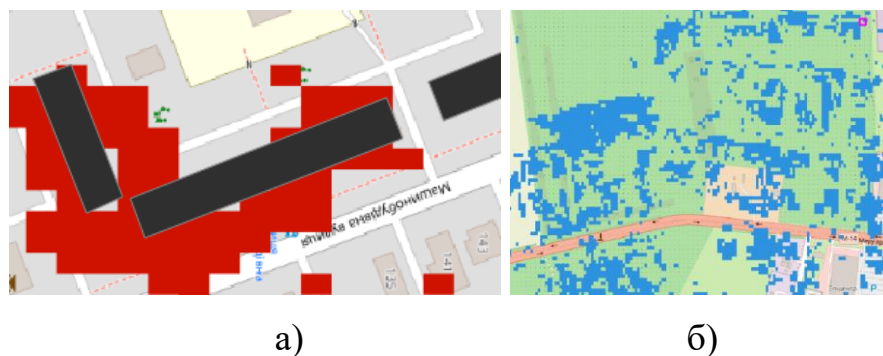


Рис. 4.2. а - знесена будівля, б – новий будівельний майданчик

#### 4.1.1 Лівобережний район

У Лівобережному районі повністю демонтовано як мінімум 2 квартали, біля заводського управління, 3 і 4 мікрорайони та окремі будинки навколо пл. Перемоги. Численні ушкодження та демонтовані багатоповерхівки також зафіксовані вздовж проспекту Перемоги, вул. Азовстальська, вул. Полтавська, вул. Тернова, провулок Рівненський та у житлових масивах «Східний», просп. Свободи (історично «Ленінградський»), в останньому орієнтовно проживало 18 тис. осіб [1]. Зміни у малоповерховій забудові також ідентифіковані особливо вздовж вулиці Таганрозька.

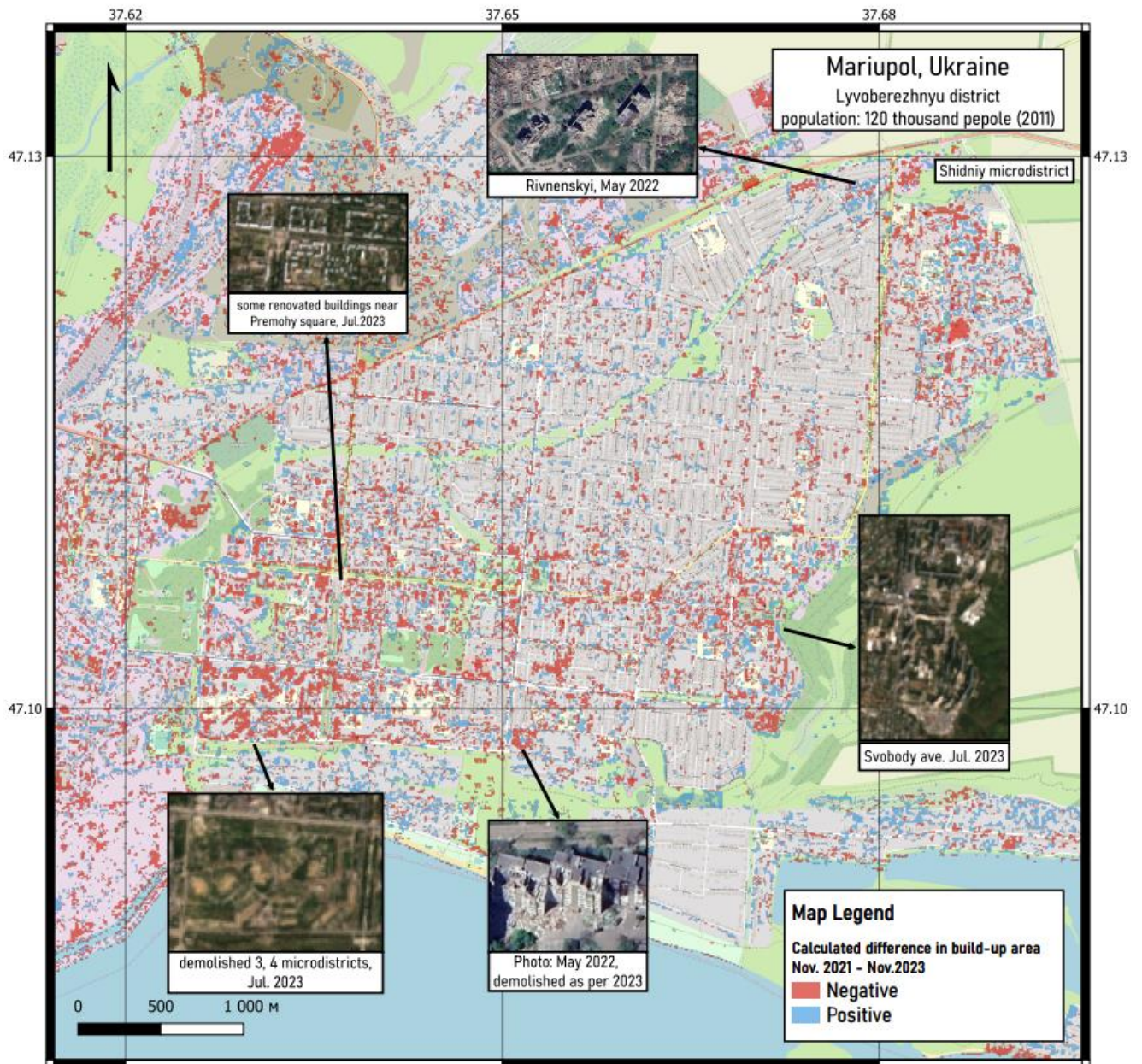


Рис.4.3 Зміни у Лівобережному районі

#### 4.1.2 Кальміуський район

Кальміуський район розташований на півночі Маріуполя, до його складу також входять 5 поселень: Талаківка, Ломакине, Сартана, Старий Крим та Каменськ. До Маріуполя прилягає центральна частина району, яка також складається з колишніх поселень: Мирне, Гугліне, Азов-Кільце, Садки, Річний, Зірка, Ворошилівське, Україна I та II, Волонтерівка. Практично весь район складається із малоповерхової забудови, і лише двох багатоповерхових мікрорайонів.

Кальміуський район був одним із перших по якому прийшовся удар російських військ. Про це свідчить великі за площею руйнування у крайніх поселеннях, особливо у Мирному, Волонтерівці та Україна. Поселення ближче до промислової зони зазнали менших ушкоджень.

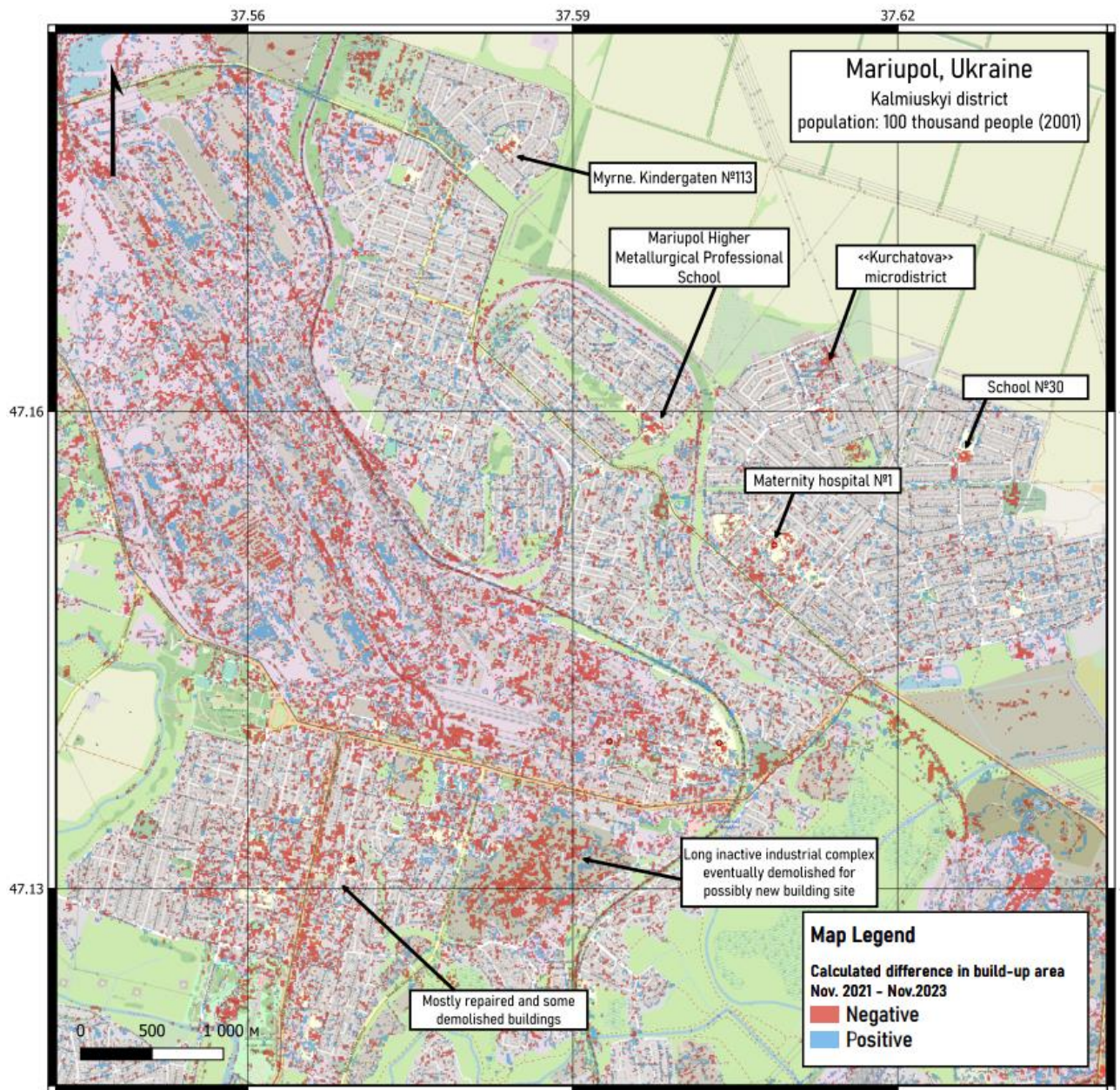


Рис.4.4 Зміни у Кальміуському районі

За допомогою алгоритму вдалося зафіксувати зміни у наступних об'єктах: дитячий садок №113, №149, школа №30 та 45, Маріупольське металургійне професійне училище – знесені, демонтовані багатоповерхові будинки 232-го кварталу та мікрорайону «Курчатова», пошкоджений пологовий будинок №1.

Зафіксовані зміни у кольорі дахів у мікрорайоні «Новий аеродром», скоріш за все це пов'язано з їх ремонтом після бойових дій. (рис.4.5)



Рис.4.5 Зміна кольору дахів у мікрорайоні «Новий аеродром».

#### **4.1.3 Центральний район**

Центральний район міста зазнав наймасштабніших руйнувань. Фактично уся східна частина району, яка ближче до «Азовсталі», була зруйнована. Вздовж просп. Металургів відбувається знесення багатопверхових будинків, лінія руйнувань продовжується до Драматичного Театру й іде далі, на захід, вздовж проспекту Миру.

Впродовж окупації, у Центральному районі були побудовані нові мікрорайони та житлові будинки. На в'їзді до міста, зі сторони Бердянська, іде будівництво мікрорайону «Невській» та «Ізумрудний». Вздовж бульвару Шевченка, в «Кіровському» мікрорайоні, зведено триповерхові житлові будинки.

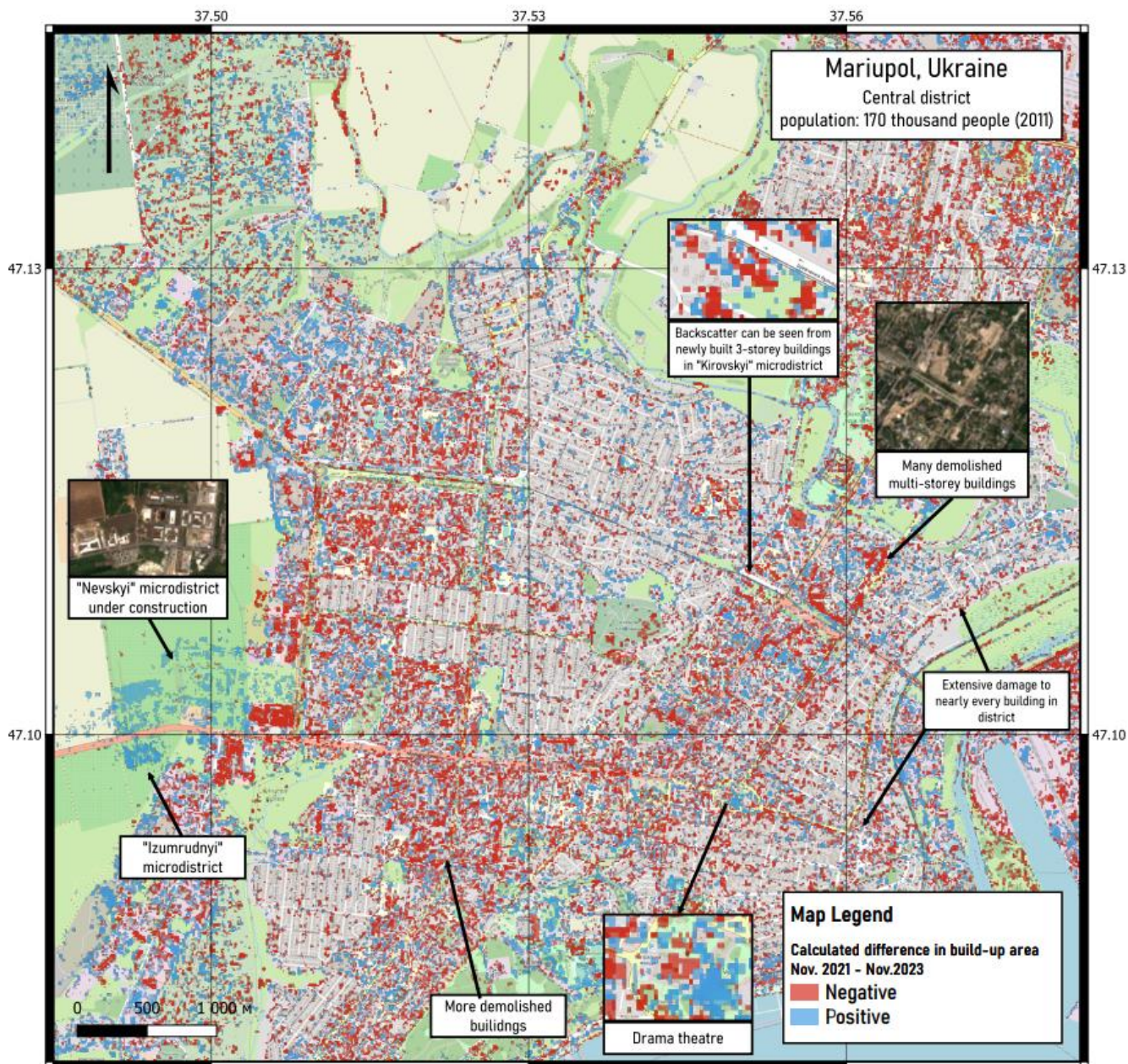


Рис. 4.6 Зміни у Центральному районі

#### 4.1.4 Приморський район

Приморський район є найменшим по населенню районом, бо більшу його частину складає малоповерхова забудова. Через що використання алгоритму в даному районі дало малу інформативність. Тим не менш можна відмітити мікрорайон «Черемушки», який як і більшість інших у місті знесено. За візуальним аналізом будинки вздовж проспекту Нахімова здебільшого мають ушкодження фасадів та дахів, ведуться роботи по їх відновленню, але все ж таки є і зруйновані.

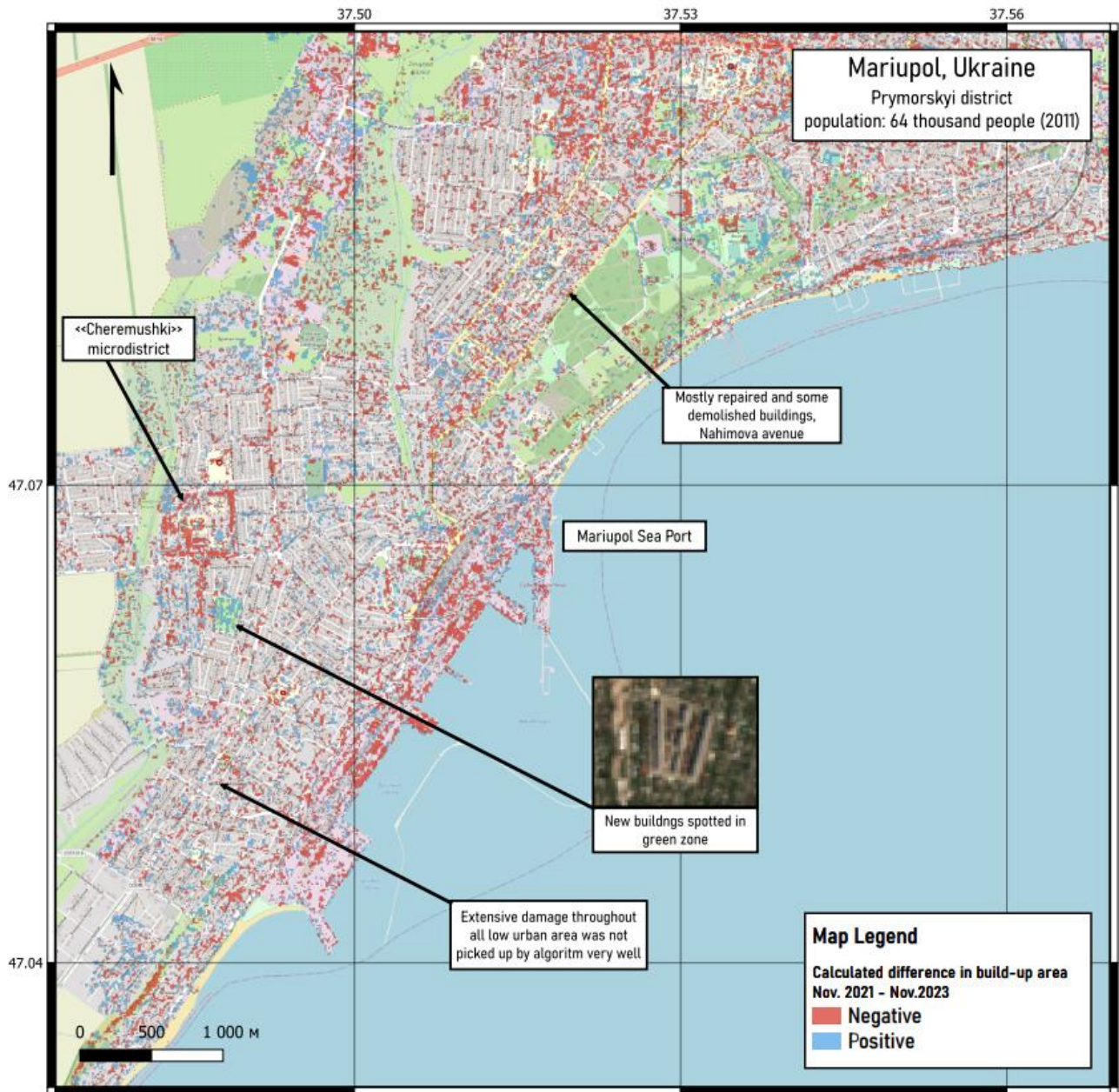


Рис.4.7 Зміни у Приморському районі

Нові забудови були ідентифіковані у колишній зеленій зоні між вулицями Ялтинська та Іртинівська. Їх призначення з'ясувати не вдалося, але скоріш за все це малоповерхові житлові будинки.

#### 4.2. Валідація та оцінка точності методів

Валідація на основі незалежних даних дозволить отримати об'єктивну оцінку роботи моделі класифікації. Для цього необхідно виконати класифікацію ще раз, але застосовуючи валідаційні класи. Далі створюється матриця похибок,

порівнюючи очікувані класи ‘classification’ до справжніх ‘landcover’ [додаток 4]. Статистичне значення каппа дає єдину оцінку результату класифікації, та представляє собою нормалізовану точність класифікації.

```

S2 2021 Validation error matrix: OPT SAR 2021 Validation error matrix:
List (5 elements)                List (5 elements)
  >0: [0,0,0,0,0]                 >0: [0,0,0,0,0]
  >1: [0,468,37,0,11]             >1: [0,722,6,0,8]
  >2: [0,344,11112,0,0]           >2: [0,0,16796,0,5]
  >3: [0,2,0,18,0]                >3: [0,0,0,20,0]
  >4: [0,1,0,0,12]                >4: [0,0,0,0,13]

S2 2023 Validation error matrix: OPT SAR 2023 Validation error matrix:
List (5 elements)                List (5 elements)
  >0: [0,0,0,0,0]                 >0: [0,0,0,0,0]
  >1: [0,438,64,0,14]             >1: [0,712,9,0,15]
  >2: [0,32,11313,0,111]         >2: [0,2,16778,0,21]
  >3: [0,2,0,18,0]                >3: [0,4,0,16,0]
  >4: [0,1,0,0,12]                >4: [0,0,2,0,11]

```

Рис.4.8 Матриці похибок

Інтеграція оптичних даних з радарними позитивно відобразилась на точності класифікації земного покриття.

Табл. 4.1

Класифікатор	Загальна точність	Каппа
2021 Sentinel 2	0,97	0,70
2023 Sentinel 2	0,98	0,80
<b>2021 Sentinel 1 + Sentinel 2</b>	<b>0.99</b>	<b>0.98</b>
<b>2023 Sentinel 1 + Sentinel 2</b>	<b>0.99</b>	<b>0.96</b>

### 4.3 Рекомендації для картографування та моделювання руйнувань

У дослідженнях [17] та методичних вказівках [18] застосовується “Speckle filter” або фільтрація зернистості. Це етап попередньої обробки радарних даних для зменшення впливу шуму утвореного зворотнім розсіюванням яке відбивається по декілька разів від незначних об’єктів [20]. По суті це цифрове згладжування растрового зображення. В даній роботі цей етап пропущений через помилку у вибірці каналів радарних знімків, яка заважала виконанню фільтрації шумів.

Цілком можливо, що застосування цього фільтру зможе знизити кількість неякісних даних оцінки змін.

Була спроба порівняти результати дослідження із даними UNOSAT, які можна завантажити із сайту Unitar у shp форматі [3]. Але, виявилось що ці дані були незакінченими, тому даний етап був відкинтий.

Отримані результати дослідження можна використовувати в поєднанні із шаром забудов, наприклад OSM, для поадресної ідентифікації можливих порушень споруд. Використовуючи векторний аналіз можна виконати різницю полігонів будинків із полігонами змін та вивести відсоткове значення перекриття, додавши його до атрибутів шару OSM.

Одним з можливих способів покращити якість аналізу руйнувань – це використати дані більшої роздільної здатності. Завдяки цьому можна буде ідентифікувати ушкодження окремих секцій та фасадів будинків, а також чіткіші зміни у малоповерховій забудові.



Рис. 4.8 Зразок із аналізу руйнувань Авдіївки за даними ANSARO-2 з роздільною здатністю 1м. (квітень 2022 – січень 2023)

Джерело: Cesium Ion [4]

#### **4.4 Висновки до четвертого розділу**

Отже, у четвертому розділі були створені тематичні карти змін у забудові кожного району Маріуполя. Порахована кількість окремих змін для позитивних та негативних значень яка становить 82894 окремих полігонів, (45965 позитивних значень, 41647 негативних значень) на сумарну площу 2326,2 га.

Порівнюючи отримані дані із публічно доступними даними Google Earth були визначені об'єкти інфраструктури які зазнали ушкоджень або були знесені до них входять школи, садочки та багатоповерхова забудова. В обов'язковому порядку була виконана оцінка точності методів використовуючи матрицю похибок та коефіцієнту Каппа, для цього використовувались валідаційні класи. Підтверджено що інтеграція двох типів даних позитивно впливає на загальну точність класифікації земної поверхні. Запропоновані можливі варіанти для вдосконалення алгоритму та моделювання руйнувань.

## ВИСНОВОК

У цьому дослідженні були використані дані супутникового спостереження Sentinel-1 та Sentinel-2 для аналізу руйнувань міста Маріуполь. У веб-сервісі Google Earth Engine, мовою програмування JavaScript, був створений скрипт послідовного виконання дій та розрахунків. Для аналізу були використані знімки з проміжком часу 2 роки – з 2021 по 2023.

Поєднання радарних та мультиспектральних даних дозволило створити точнішу модель класифікації поверхні завдяки сильним сторонам обидвох типів даних. Класифікація поверхні була виконана із застосуванням алгоритму Random Forest. Для цього використовувались тренувальні та валідаційні класи, які були визначені на знімках Sentinel-2.

Для порівняння точності було створено дві моделі: 1) класифікацією за індексом NDBI мультиспектральних знімків; 2) На основі мультиспектральних та радарних даних. За отриманими результатами точності, виконаних матрицею похибок та статистичним значенням Каппа, було доведено що поєднання двох типів даних позитивно впливає на точність класифікації урбанізованих регіонів.

Були розраховані площі класів забудови, вегетації, води та відкритих гірських порід. Із класу забудов були створені маски двох часових проміжків для знаходження різниці між ними. Різниці були визначені як «позитивні» та «негативні».

Алгоритм можна використовувати для аналізу будь якого міста України та всього світу. Він має можливості для вдосконалення, наприклад застосовуючи дані більшої роздільної здатності або визначення більшої кількості тренувальних класів.

Результати алгоритму були експортовані на ПК для подальшого аналізу у ГІС середовищі – програмному забезпеченні QGIS. Растрові дані були перетворені у векторні, розраховані статистичні дані по кількості об'єктів та їх площам. Створені карти для візуального подання результатів та подальшого аналізу.

Всього було зафіксовано 82894 окремих змін, (45965 позитивних значень, 41647 негативних значень). Загальна площа розрахованих змін становить 2326,2 га. За візуальним аналізом було зафіксовано місця найбільших змін у інфраструктурі

міста, були визначені: знесені будівлі, пошкоджені будівлі та новозбудовані будівлі.

В цілому, алгоритм впорався із поставленими задачами класифікації та візуалізації змін, але ефективним був лише для багатоповерхової забудови. Найбільшим обмеженням виступає роздільна здатність вхідних даних, що не дозволяє отримати детальніші зміни у структурі об'єктів, особливо малоповерхової забудови. Важливим є те, що алгоритм має місце для вдосконалення: можна надати більше тренувальних класів або використати інший класифікатор, використати композиції знімків з різних ракурсів (напрямку орбіт) та вищої роздільної здатності.

Дана робота відображає актуальність теми в умовах військового стану будь якої країни. Аналіз руйнувань за даними дистанційного зондування Землі дозволяє ефективно та швидко фіксувати глобальні зміни у інфраструктурі міста, що підштовхує до невідкладної розробки планів із ліквідації наслідків.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wikipedia. Маріуполь. – Режим доступу: <http://surl.li/ulft> (Дата звернення 21.11.2023)
2. The Economist – Режим доступу: <https://www.economist.com/graphic-detail/2022/04/23/nearly-half-of-mariupol-has-suffered-grave-damage> (Дата звернення 31.10.2023)
3. MARIUPOL UPDATED BUILDING DAMAGE ASSESSMENT OVERVIEW MAP - LIVOBEREZHNYI AND ZHOVTNEVYI DISTRICTS – Режим доступу: <https://www.unitar.org/maps/map/3561> (Дата звернення 31.10.2023)
4. Cesium ion – Режим доступу: <https://ion.cesium.com/stories/viewer/?id=8be6f99c-0d4c-46ce-91a3-313e3cac62fe> (Дата звернення 13.11.2023)
5. Japan researchers create online maps with satellite images to expose damage in Ukraine – Режим доступу: <http://surl.li/ngwfl> (Дата звернення 13.11.2023)
6. Ram Niwas, M.S. Grewal and M.L. Khichar. Practical manual on Remote Sensing , GIS and Land Use Planning
7. Є.Л. Кринов / Спектральна отражательная способность природных образований – видавництво академії наук СРСР, 1947. – с. 74-99
8. ESA – 50 Years of Earth Observation – Режим доступу: [https://www.esa.int/About\\_Us/ESA\\_history/50\\_years\\_of\\_Earth\\_Observation](https://www.esa.int/About_Us/ESA_history/50_years_of_Earth_Observation) (Дата звернення 06.11.2023)
9. M.Anji Reddy. Textbook of Remote Sensing and Geographical Information Systems. Third Edition. ISBN: 978-81-7800-135-7 – с. 55, с. 61
10. Thomas M. Lillesand Remote Sensing and Image Interpretation – с. 399
11. Alberto Moreira. Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications. Презентація Power Point. ESA – Режим доступу: <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/0/6-LTC2013-SAR-Moreira.pdf/67af26dd-96c6-8ed9-a13e-59b302da5afd?version=1.0&t=1603205248128>
12. Методичні вказівки до практичного заняття з дисципліни „Супутниковий моніторинг” для студентів 4 курсу очної форми навчання за напрямом

„Гідрометеорологія” і спеціалізацією „Технічні системи гідрометеорологічного моніторингу”. / Перелигін Б.В., Гордієнко В.І. – Одеса, ОДЕКУ, 2013 р

13. Difference Between Supervised and Unsupervised Classification In Remote Sensing – Режим доступу: <https://www.spatialpost.com/supervised-vs-unsupervised-remote-sensing/> (Дата звернення 02.11.2023)

14. Google Earth Engine. – Режим доступу: <https://earthengine.google.com/>

15. К.т.н. Маслій Р.В., Філіпчук О.Ю. Вінницький національний технічний університет ЗАСТОСУВАННЯ ВИПАДКОВИХ ЛІСІВ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ДАНИХ

16. Random Forests Leo Breiman and Adele Cutler – Режим доступу: [https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc\\_home.htm](https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/cc_home.htm) (Дата звернення 14.11.2023)

17. Aimaiti Y, Sanon C, Koch M, Baise LG, Moaveni B. War Related Building Damage Assessment in Kyiv, Ukraine, Using Sentinel-1 Radar and Sentinel-2 Optical Images. Remote Sensing. 2022; 14(24):6239 – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/rs14246239>

18. Sentinel-hub, EO Browser. – Режим доступу: <https://www.sentinel-hub.com/>  
NASA ARSET: Land Cover Classification and Accuracy Assessment in Google Earth Engine. – Режим доступу: <http://surl.li/nofqz>

19. Wikipedia. Адміністративний поділ Маріуполя – Режим доступу: <http://surl.li/ngvcz> (Дата звернення 18.11.2023)

20. Lee, J. & Jurkevich, L. & Dewaele, Piet & Wambacq, Patrick & Oosterlinck, A.. (1994). Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A Review. Remote Sensing Reviews. 8. 10.1080/02757259409532206.

21. Prasad S. Thenkabail, PhD // Remote Sensing Handbook, Volume III

22. Ade Febri Sandhini Putri, Wirastuti Widyatmanti, Deha Agus Umarhadi // Sentinel-1 and Sentinel-2 data fusion to distinguish building damage level of the 2018 Lombok Earthquake, Remote Sensing Applications: Society and Environment, Volume 26, 2022, 100724, ISSN 2352-9385, – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100724>

23. Sentinel-2 MSI User Guide – Режим доступу: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>
24. Zhang, Liqiang & Hou, Zhengyang & Qu, Ying & Shi, Qian & Yu, Qiwei & Zhao, Yuanyuan & Tang, Hong & Yuebin, Wang & Li, Xingang & Li, Yang & Peng, Shuwen & Yao, Xin & Zhou, Chenghu. (2023). Satellite monitoring of war urban damage with a temporal knowledge-guided deep learning scheme. 10.21203/rs.3.rs-2799404/v1.
25. Canty, M.J.; Nielsen, A.A.; Conradsen, K.; Skriver, H. Statistical Analysis of Changes in Sentinel-1 Time Series on the Google Earth Engine. Remote Sens. 2020, 12, 46. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/rs12010046>
26. Korkmaz, F.; Antoniou, M. A New Concept of Contiguous-Swath SAR Imaging with High Resolution: Strip-Spot SAR. Sensors 2022, 22, 9153. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s22239153>
27. Medina, José & Atehortúa, Beatriz. (2019). Comparison of maximum likelihood, support vector machines, and random forest techniques in satellite images classification. Tecnura. 23. 3-10. 10.14483/22487638.14826.
28. Mullissa, A.; Vollrath, A.; Odongo-Braun, C.; Slagter, B.; Balling, J.; Gou, Y.; Gorelick, N.; Reiche, J. Sentinel-1 SAR Backscatter Analysis-Ready-Data Preparation in Google Earth Engine. Remote Sens. 2021, 13, 1954. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/rs13101954>
29. Yan L, Wu T, Wang X. Polarization Remote Sensing for Land Observation [Internet]. Understanding of Atmospheric Systems with Efficient Numerical Methods for Observation and Prediction. IntechOpen; 2019. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79937>
30. Hannes Mueller; Andre Groeger; Jonathan Hersh; Andrea Matranga; Joan Serrat // Monitoring war destruction from space using machine learning – Режим доступу: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2025400118>
31. National Ecological Observatory Network (NEON) – Tutorial, Raster 04: Work With Multi-Band Rasters - Image Data in R – Режим доступу: <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/dc-multiband-rasters-r>
- (Дата звернення 24.11.2023)

## ДОДАТКИ

### Додаток 1

#### Зразок коду вибірки знімків

```
// Load Sentinel-1 SAR GRD data, descending
    var sar_2021 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
    .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation',
    'VV'))
    .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation',
    'VH'))
    .filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'DESCENDING'))
    .filter(ee.Filter.date('2021-11-16', '2021-11-18'))
    .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW'))
    .filter(ee.Filter.eq('resolution_meters', 10))
    .filterBounds(region)

// Load Sentinel-2 data
    var image =
ee.Image('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210727T082609_20210727T08351
2_T37TCN')
    var image_2023 =
ee.Image('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20230707T082609_20230707T08280
0_T37TCN')
```

### Додаток 2

#### Зразок коду розрахунку площі та створення графіків:

```
//Area by class in hectar
// Calculate the area for each land cover class in hectares
var pixelArea = ee.Image.pixelArea().divide(10000); // pixel
area in hectares
var areaImage = pixelArea.addBands(classifiedboth_2021);

// Reduce the area image by summing over the pixels for each
land cover class
```

```

var areas = areaImage.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum().group({
    groupField: 1, // Use the land cover classification band
    groupName: 'landcover_class',
  }),
  geometry: region,
  scale: 10, // The scale should match the resolution of your
classification
  maxPixels: 1e9
});

// Print the areas to the console
print('2021 OPT+SAR land cover class (in hectares):', areas);

/// _____ chart area _____
// Assuming 'areas' is the output from the 'reduceRegion'
function
var areaGroups = ee.List(areas.get('groups'));

// Map over the list to create features
var areaFeatures = areaGroups.map(function (item) {
  item = ee.Dictionary(item);
  var landcoverClass =
ee.Number(item.get('landcover_class')).format();
  var area = ee.Number(item.get('sum'));
  return ee.Feature(null, {'class': landcoverClass, 'area':
area});
});

// Convert the list of features into a feature collection
var areaFeatureCollection = ee.FeatureCollection(areaFeatures);

// Create a chart
var areaChart = ui.Chart.feature.byFeature({
  features: areaFeatureCollection,
  xProperty: 'class',

```

```

    yProperties: ['area']
  }).setOptions({
    title: '2023 OPT+SAR Area by Land Cover Class',
    vAxis: {title: 'Area (ha)'},
    hAxis: {title: 'Land Cover Class'},
    legend: {position: 'none'}
  });

// Print the chart to the console
print(areaChart);

```

*Додаток 3*

**Зразок коду експорту зображень на Google drive:**

```

Export.image.toDrive({
  image: classifiedS2,
  description: 'classifiedS2',
  folder: 'google_earth_engine',
  region: region,
  scale: 10,
  maxPixels:1e10
})

```

*Додаток 4*

**Зразок коду розрахунку точності класифікатора**

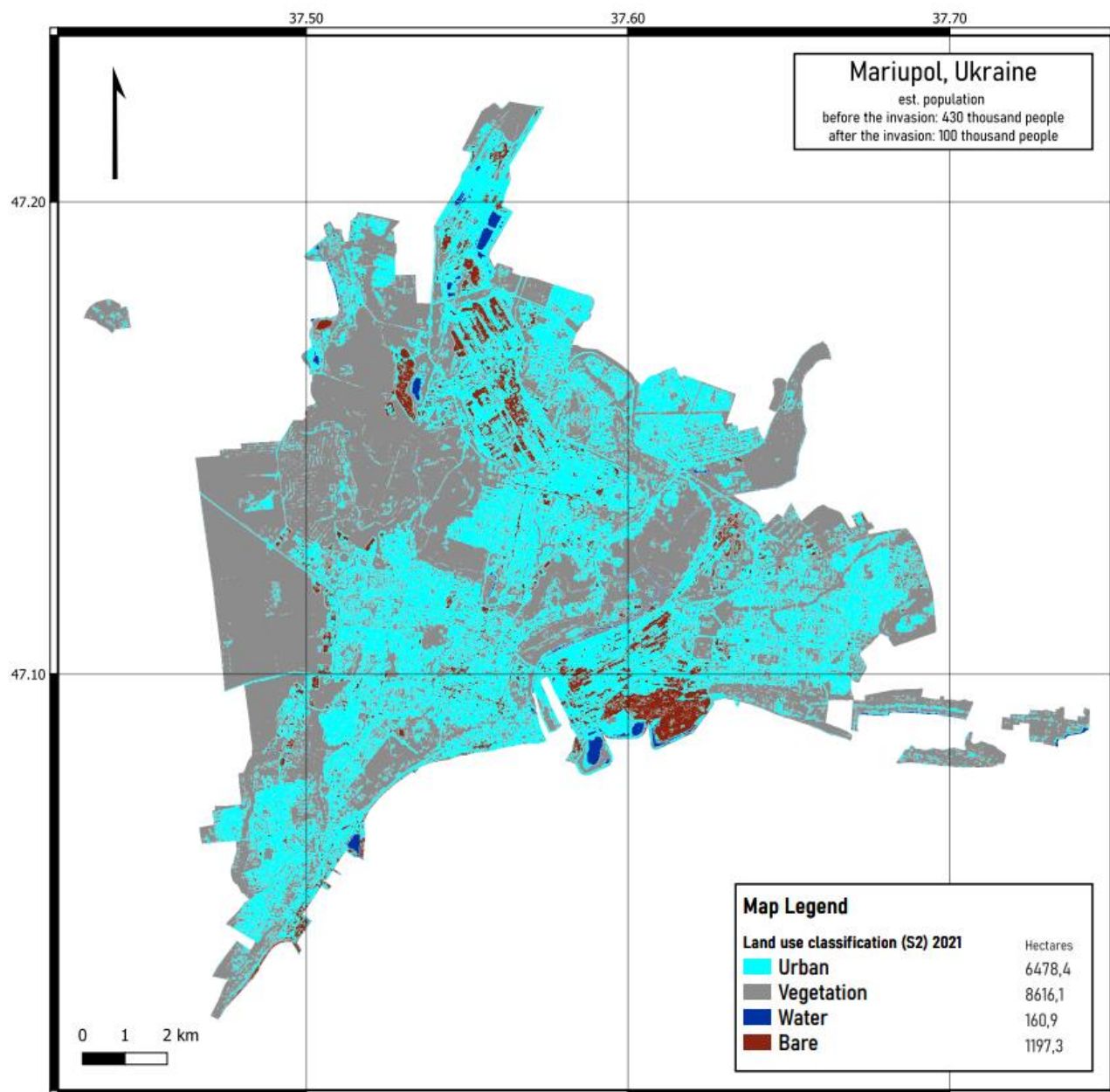
```

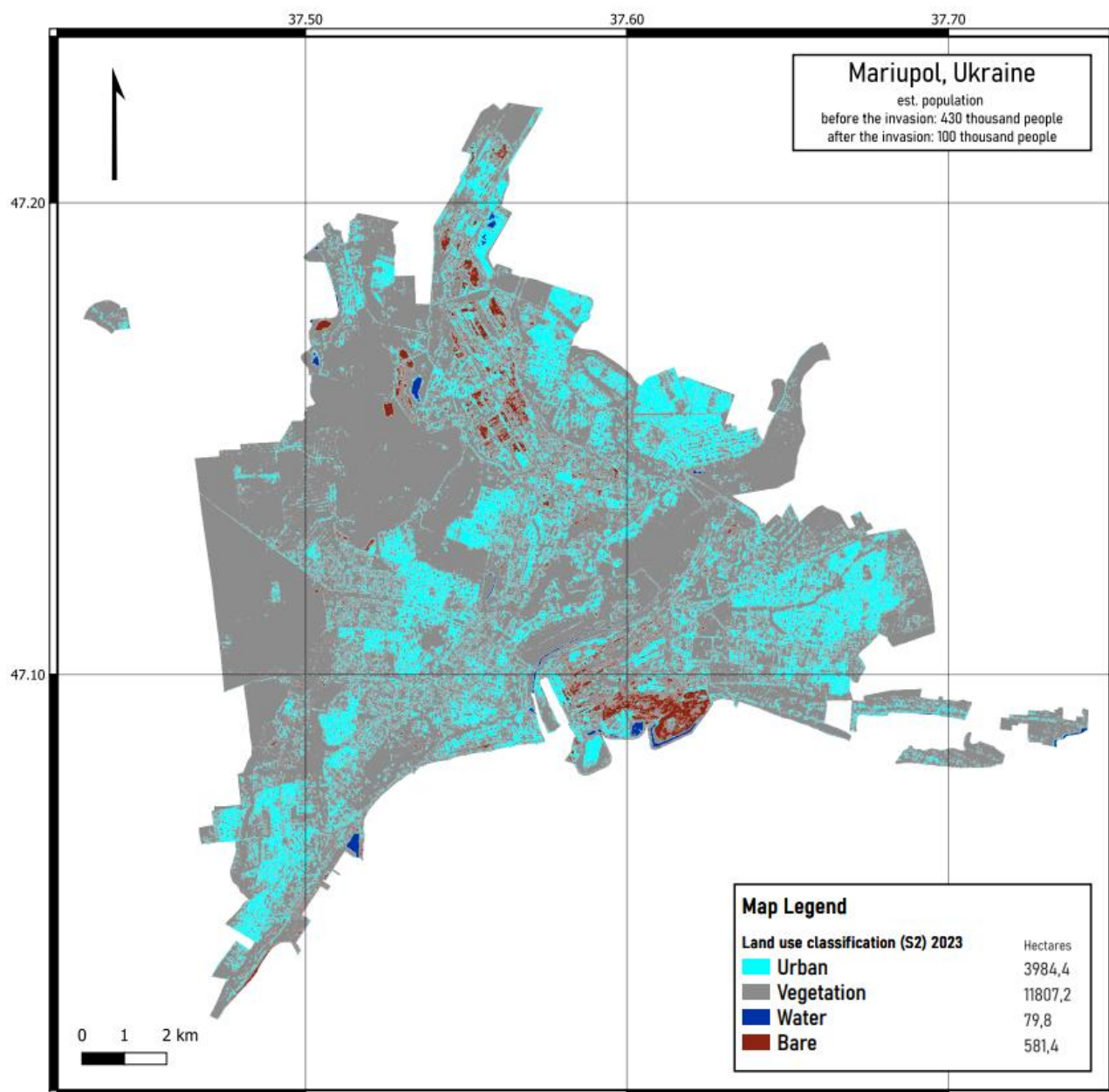
var validation = ndbicmp.sampleRegions({
  collection: features_v,
  properties: ['landcover'],
  scale: 10
});

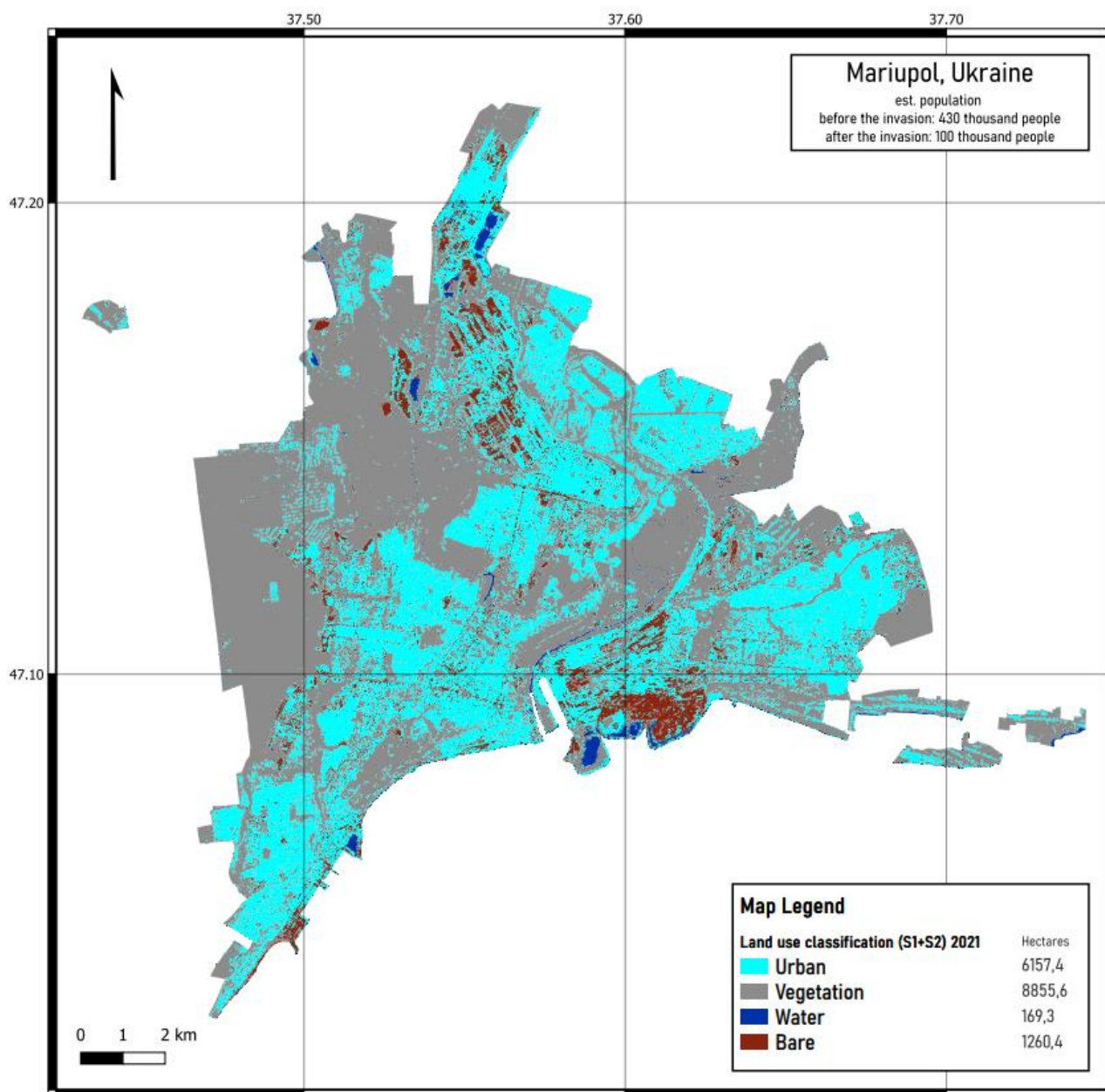
var validated = validation.classify(classifierS2);
var testErrorMatrix = validated.errorMatrix('landcover',
'classification');

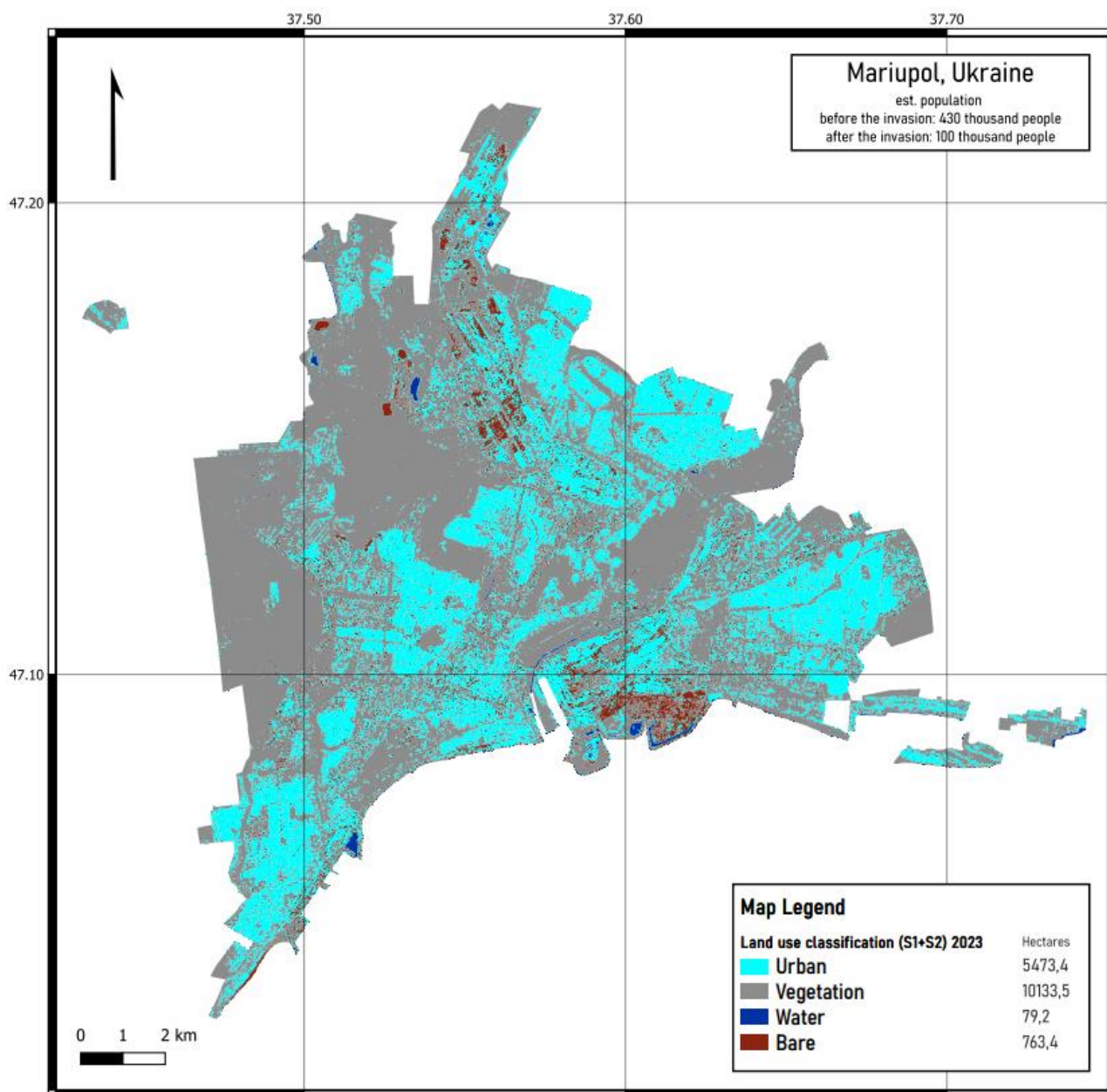
var kappa = testErrorMatrix.kappa();

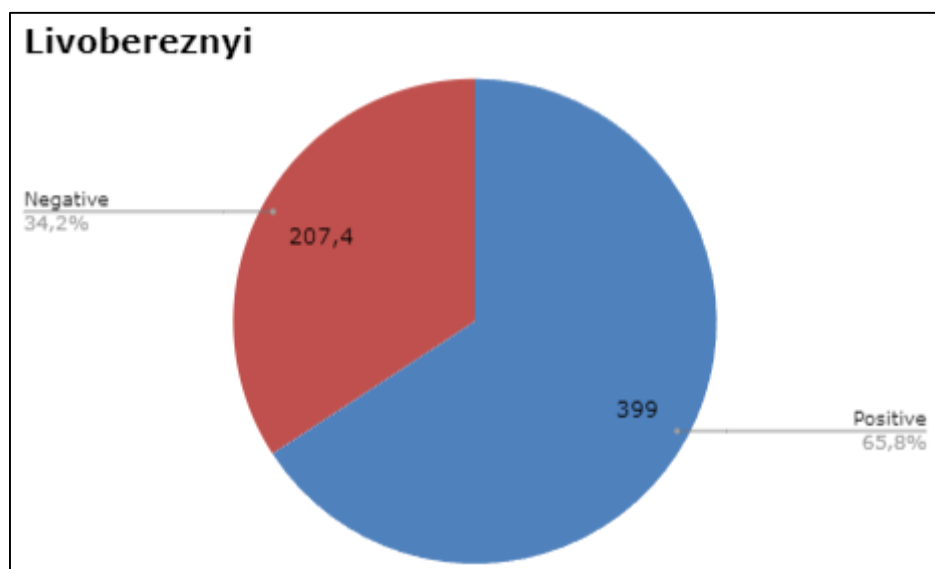
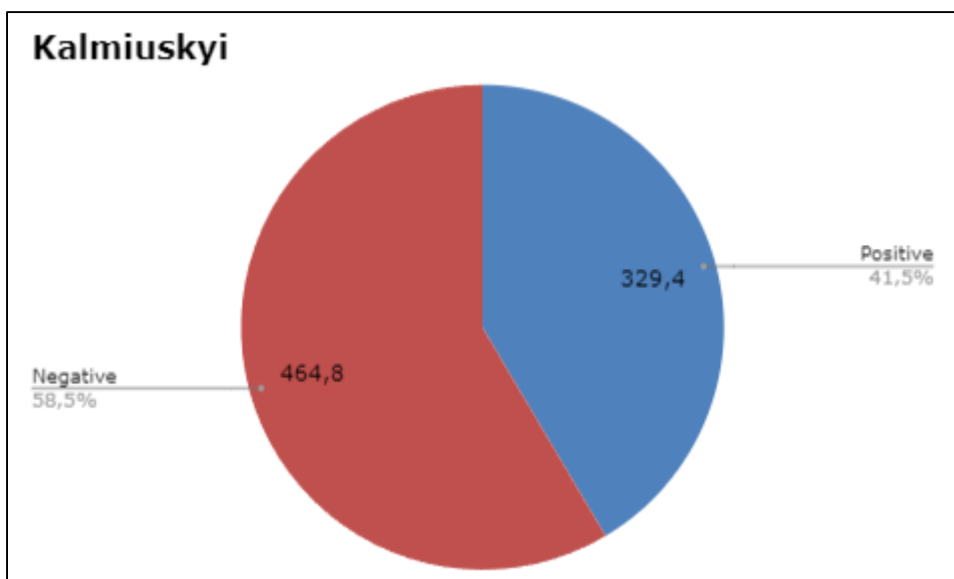
```

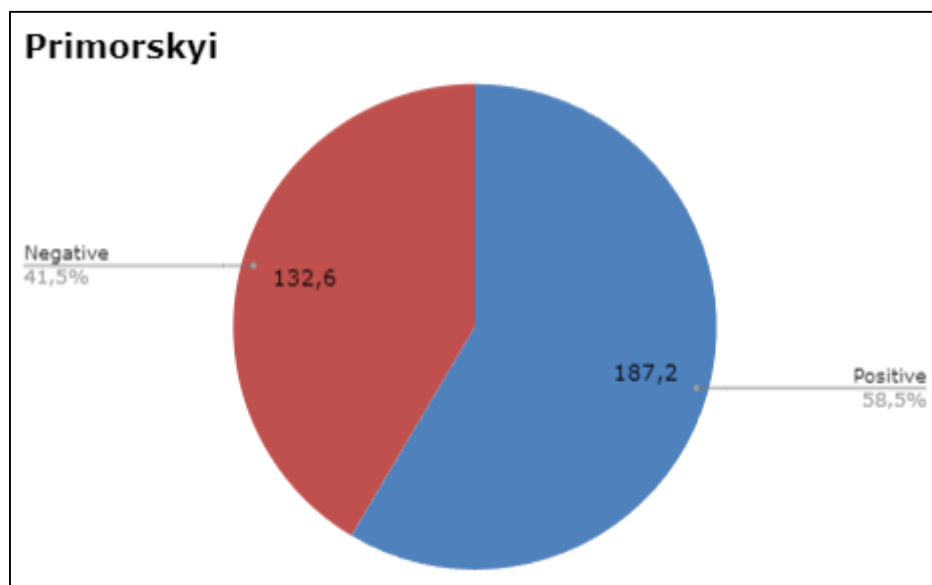
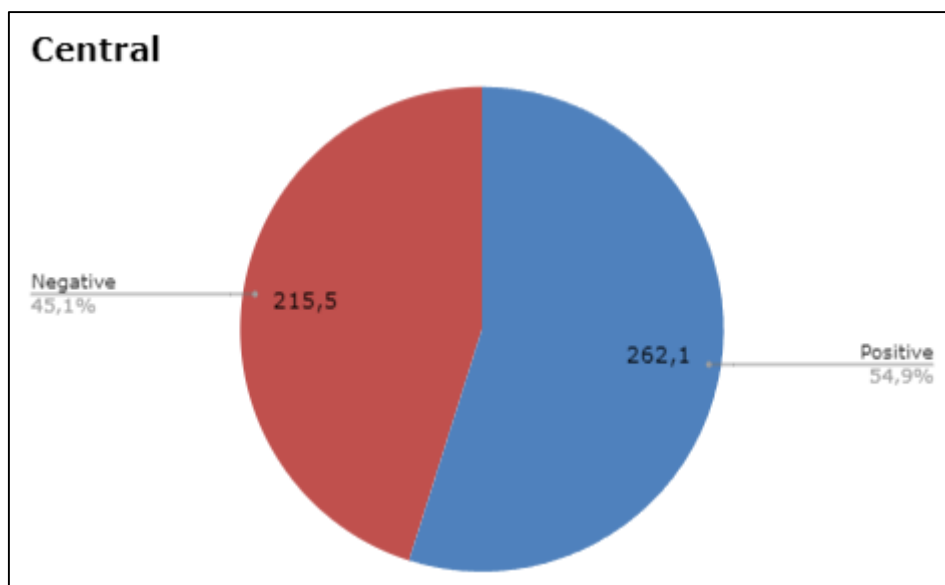


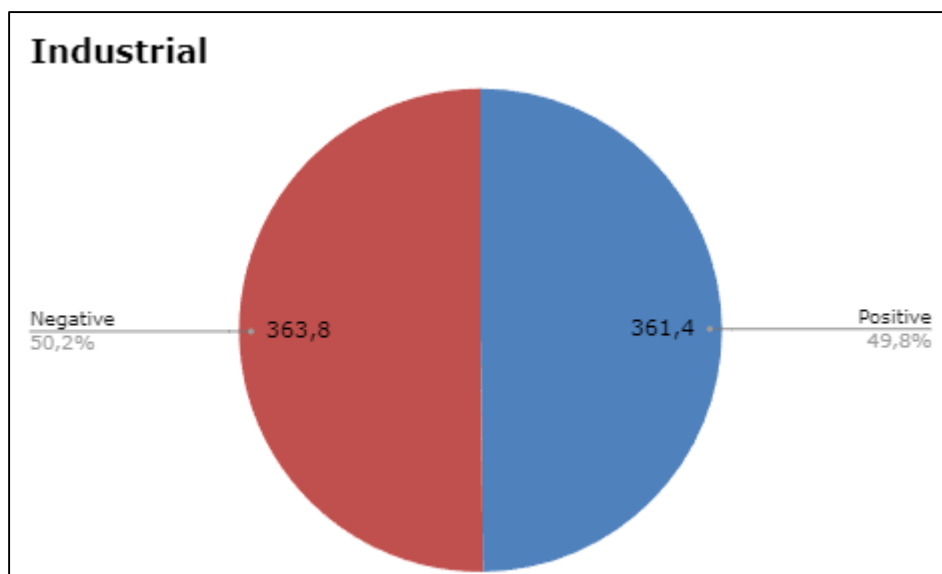












## Київський національний університет будівництва і архітектури

Факультет геоінформаційних систем і управління територіями  
Кафедра геоінформатики та фотограмметрії

Атестаційна випускна робота  
на тему:

### Моделювання міських руйнувань Маріуполя за допомогою дистанційного зондування та машинного навчання

Виконав:  
Студент групи ГСТм-22  
Мічкін Олександр Дмитрович

Керівник:  
доц. Гебрин-Байди Лілія Василівна

2023

## Мета, завдання та предмет дослідження

### Мета

Розробка методики ідентифікації та аналізу руйнувань в урбанізованих територіях на основі синтезу даних дистанційного зондування та алгоритмів машинного навчання.

### Предмет дослідження

- 1) Методи та технології ДЗЗ (мультиспектральне сканування та радарні дані)
- 2) Алгоритми машинного навчання (Random Forest).

### Завдання

- 1) Аналіз існуючих технік виявлення руйнувань
- 2) Розробка методології комбінування оптичних та радарних даних
- 3) Створення та навчання алгоритмів машинного навчання
- 4) Проведення валідації розробленої методики
- 5) Розробка рекомендацій для застосування розробленої методики

2

## Об'єкт дослідження - Маріуполь



За даними UNOSAT, станом на середину 2022 року, **5647** будівель було пошкоджено з яких **315** було зруйновано.

Населення - 492 176 осіб. (2001) Після припинення бойових дій населення міста скоротилось **в 4 рази**

3

## Результати дослідження

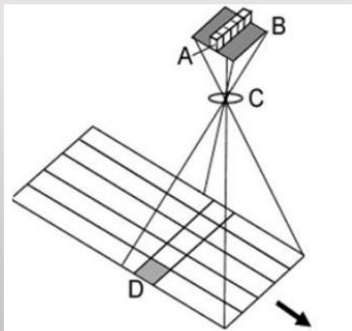


1. **Алгоритм** виконання класифікації земної поверхні на мові JavaScript у веб-сервісі Google Earth Engine;
2. **Модель** змін;
3. **Опис** змін у інфраструктурі Маріуполя по його районам

4

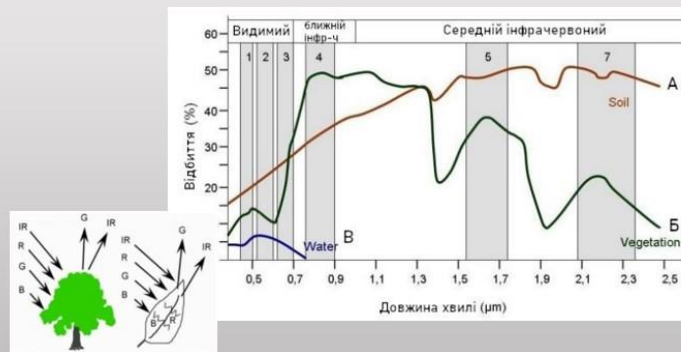
## Розділ 1. Властивості даних ДЗЗ та їх застосування

Системи мультиспектрального сканування з лінійною розгорткою (push-broom) широко використовуються в оптичних супутниках таких як Sentinel, Landsat.



Оптичні сканери розпізнають:

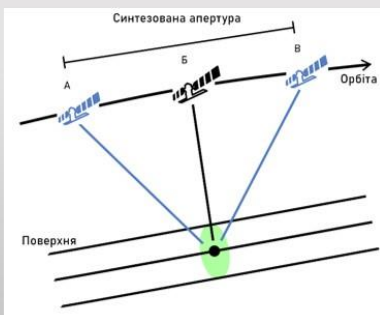
- спектральні властивості
- хімічний склад
- матеріал поверхні



5

## Розділ 1. Властивості даних ДЗЗ та їх застосування

Радар з синтезованою апертурою (SAR) – використовує відносно малу антену, але завдяки просунутим методам отримання та обробки даних, система імітує можливості більшої антени.



Радаром можна виміряти такі параметри як:

- відстань
- кут нахилу
- шорсткість
- електропровідність поверхні.



6

# Розділ 1. Супутникові системи Sentinel

**Sentinel-1** – радарна платформа для отримання GRD (Ground Range Detected) сцен.

- Роздільна здатність – 10м
- 4 поляризаційних каналів ['VV'], ['HH'], ['VV', 'VH'], ['HH', 'HV']
- Мінімальний вплив погодних умов

**Sentinel-2** – оптична, мультиспектральна платформа для отримання кольорових знімків.

- Роздільна здатність – 10-60м.
- 12 спектральних каналів ( у діапазоні від 443нм до 2190нм довжини хвилі)



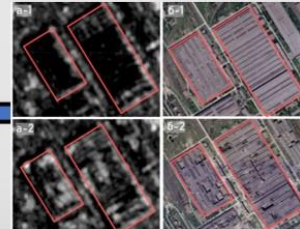
7

# Розділ 2. Метод інтеграції даних

**Оптичні дані Sentinel-2**  
Зміни у кольорі

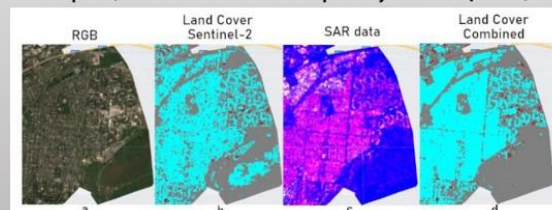


**Радарні дані Sentinel-1**  
Зміни у структурі



Google Earth Engine

Інтеграція двох типів даних дозволить покращити точність алгоритму класифікації.



8

## Розділ 2. Класифікатор Random Forest

Фрагмент коду класифікації оптичних даних з розрахованим індексом NDBI

```
var bandsS2 = ['B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8', 'NDBI'];
var trainS2 = ndbicomp.select(bandsS2).sampleRegions({
  collection: features,
  properties: ['landcover'],
  scale: 10
});
var classifierS2 = ee.Classifier.smileRandomForest(50).train({
  features: trainS2,
  classProperty: 'landcover',
  inputProperties: bandsS2
});
var classifiedS2 = ndbicomp.select(bandsS2).classify(classifierS2);
```

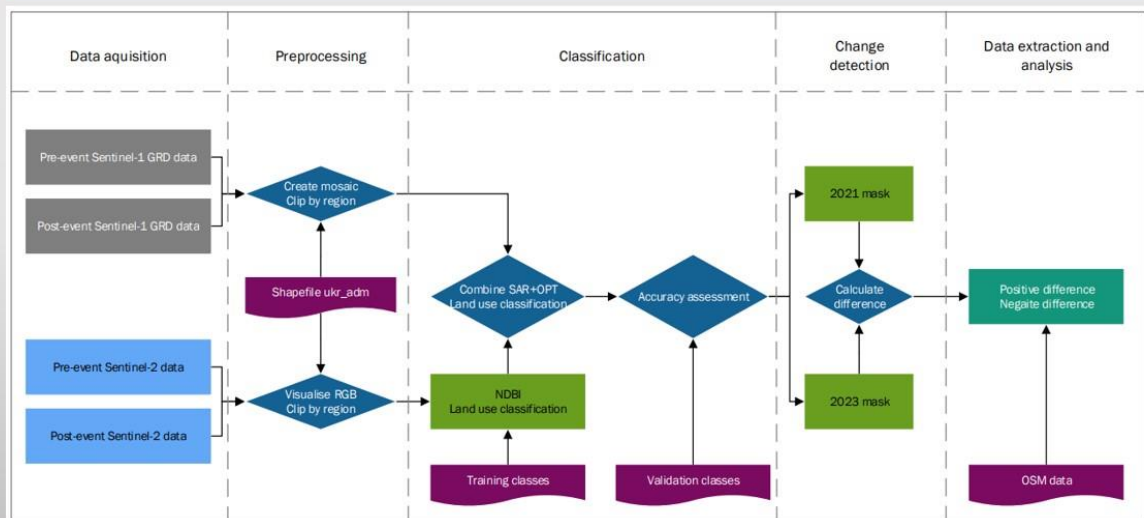
Для класифікації використаний **метод випадкових лісів (Random Forest)**.

Перевагами алгоритму випадкових лісів є:

- ефективність обробки даних із великою кількістю ознак,
- нечутливість до масштабування даних,
- багатопоточність,
- відсутність проблеми перенавчання
- простота застосування

9

## Розділ 2. Концептуальна схема



10

## Розділ 3. Вихідні дані

Параметри знімків які доступні у GEE:

Супутник	Назва	Тип даних	Опис
Sentinel-2	GENERATION_TIME	String	Дата зйомки у форматі YYYY-MM-DD
Sentinel-2	CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE	Double	Захмареність знімку у відсотках
Sentinel-1	resolution_meters	Double	Роздільна здатність у метрах
Sentinel-1	instrumentMode	String	Режим зйомки інструменту: [IW], [EW], [SM]
Sentinel-1	transmitterReceiverPolarisation	String_list	Тип поляризації: ['VV'], ['HH'], ['VV', 'VH'], ['HH', 'HV']

**Оптичні**

- 2021.07.27 та 2023.07.17
- Літній період року – низька хмарність
- Інтервал 720 днів.

**Радарні**

- 2021.11.16 та 2023.10.25
- Осінній період року – менше рослинності
- Інтервал 708 днів.
- Параметр орбіти – 'Descending' (з півночі на південь)

[!] Знімки Sentinel 1 та Sentinel 2 отримані через каталог GEE вже **попередньо оброблені**.

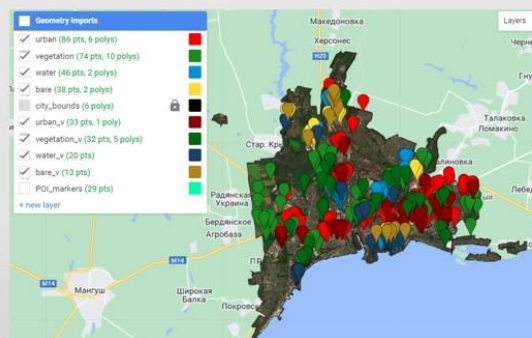
11

## Розділ 3. Тренувальні та валідаційні класи

Поверхню поділено на 4 класи:

- забудова
- вегетація
- водні поверхні
- відкриті гірські породи, ґрунти, піски

Класи	Назва	'landcover'	Кількість точок	Кількість полігонів
Тренувальні	Urban	1	86	6
	Vegetation	2	74	10
	Water	3	46	2
	Bare	4	38	2
Валідаційні	Urban_v	1	33	1
	Vegetation_v	2	32	-
	Water_v	3	20	-
	Bare_v	4	13	-



Обрані **незмінні** протягом часу точки, наприклад будівлі які вцілили, поля які не були забудовані тощо.

Використовується один набір класів для обох проміжків часу

12

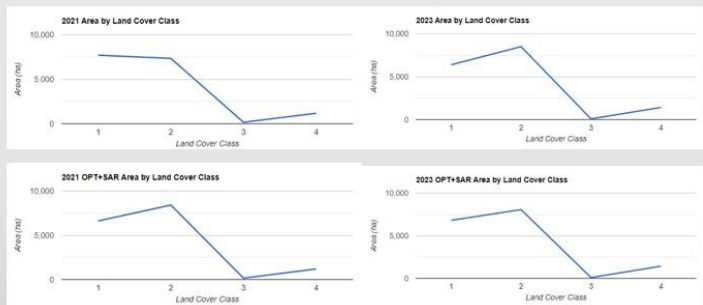
## Розділ 3. Статистичний аналіз змін у забудові

Табл. 3.4 Sentinel-2

Клас	Площа на 2021, га	Площа на 2023, га	Різниця, га
urban	7703,4	6386,3	- 1317,1 (-17,1 %)
vegetation	7335,8	8496,5	+ 1160,7 (+15,8 %)
water	164,7	85,2	- 79,5 (-48,2 %)
bare	1176,2	1412,1	+ 235,9 (+20,1 %)

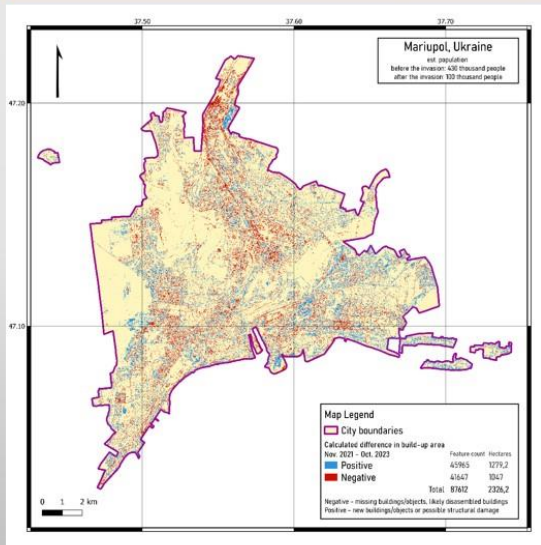
Табл. 3.5 Sentinel-1 + Sentinel-2

Клас	Площа на 2021, га	Площа на 2023, га	Різниця, га
urban	6621,4	6806,1	+ 184,7 (+2,8 %)
vegetation	8412,7	8059,6	- 353,1 (-4,2 %)
water	153,9	91,2	- 62,7 (-40,7 %)
bare	1192,0	1423,2	+ 231,2 (+19,4 %)



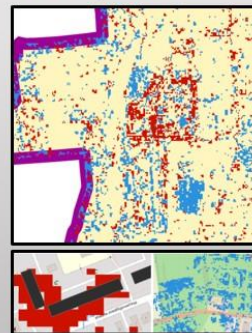
13

## Розділ 4. Результати, модель змін



На моделі зафіксовані **позитивні** та **негативні** зміни.

- зміни у інфраструктурі міста
- **знесені** та **новозбудовані** будинки
- пошкодженні секції будівель
- нові та відсутні об'єкти
- відбиття спровоковане невеликою зміною кута спостереження

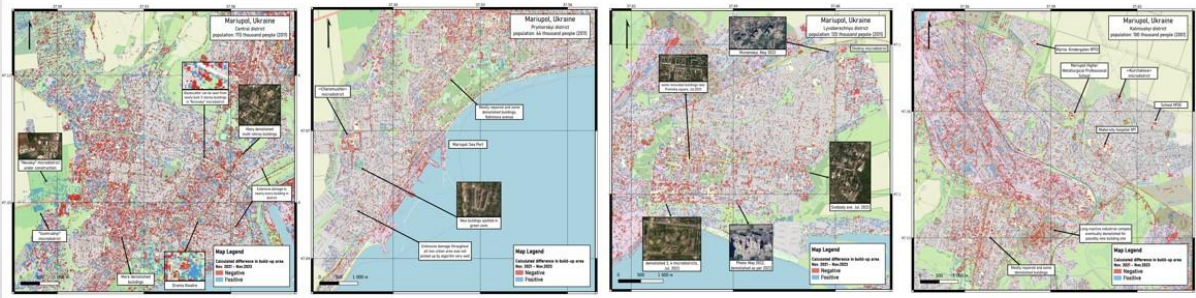


Всього було зафіксовано **82894** окремих змін, (45965 позитивних, 41647 негативних) на сумарну площу **2326,2 га**.

Зміни поза індустріальними зонами становлять: **681 га** – негативних, **917 га** – позитивних.

14

## Розділ 4. Моніторинг результатів для окремих районів Маріуполя

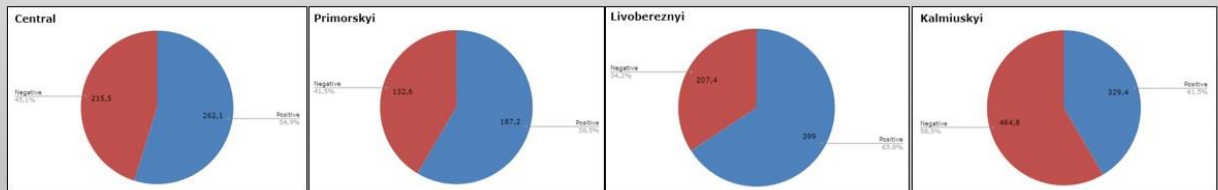


Центральний р-н

Приморський р-н

Лівобережний р-н

Кальміуський р-н



15

## Розділ 4. Оцінка точності

Для оцінки точності використовувалась матриця похибок та статистичне значення Каппа.

```
var testErrorMatrix = validated.errorMatrix('landcover',
'classification');
var kappa = testErrorMatrix.kappa();
```

[!] Для оцінки точності використані валідаційні класи.

```
S2 2021 Validation error matrix: OPT SAR 2021 Validation error matrix:
List (5 elements) *List (5 elements)
*0: [0,0,0,0,0] *0: [0,0,0,0,0]
*1: [0,469,27,0,11] *1: [0,722,0,0,0]
*2: [0,344,11112,0,0] *2: [0,0,16796,0,5]
*3: [0,2,0,18,0] *3: [0,0,0,20,0]
*4: [0,1,0,0,12] *4: [0,0,0,0,13]

S2 2023 Validation error matrix: OPT SAR 2023 Validation error matrix:
List (5 elements) *List (5 elements)
*0: [0,0,0,0,0] *0: [0,0,0,0,0]
*1: [0,438,64,0,14] *1: [0,712,9,0,15]
*2: [0,32,11313,0,111] *2: [0,2,16778,0,21]
*3: [0,2,0,18,0] *3: [0,4,0,16,0]
*4: [0,1,0,0,12] *4: [0,0,2,0,11]
```

Класифікатор	Загальна точність	Каппа
2021 Sentinel 2	0,97	0,70
2023 Sentinel 2	0,98	0,80
2021 Sentinel 1 + Sentinel 2	0,99	0,98
2023 Sentinel 1 + Sentinel 2	0,99	0,96

Інтеграція оптичних даних та радарних позитивно відобразилась на точності класифікації земного покриття.

16

## Висновки

- Створений алгоритм для аналізу супутникових зображень з метою ідентифікації змін у забудові міста
- Доведено що синтез двох типів даних позитивно впливає на точність класифікації поверхні
- Створена модель на якій ідентифіковано позитивні та негативні зміни у інфраструктурі Маріуполя
- Проаналізовані зміни у інфраструктурі міста