

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА
Географічний факультет
Кафедра геодезії, картографії та управління територіями**

**МОНІТОРИНГ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ
ПРИФРОНТОВИХ ТЕРИТОРІЙ ДОНЕЦЬКОЇ ОБЛАСТІ
ЗАСОБАМИ ДЗЗ ТА ГІС**

**Кваліфікаційна робота
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)**

Виконав
студент II курсу 208-М групи
спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій»
Круль Данило-Дмитро Володимирович

Керівник: к. геогр. н.,
доцент кафедри геодезії, картографії та
управління територіями
Дарчук Костянтин Вікторович

До захисту допущено:
протокол засідання кафедри № 3
від «18» «листопада» 2025 р.
Зав. кафедою _____ доц. Дарчук К.В.

Чернівці - 2025

АНОТАЦІЯ

Круль Данило-Дмитро Володимирович

Здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій, ОПП «Геодезія»

кафедри геодезії, картографії та управління територіями Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна

МОНІТОРИНГ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ ПРИФРОНТОВИХ ТЕРИТОРІЙ ДОНЕЦЬКОЇ ОБЛАСТІ ЗАСОБАМИ ДЗЗ ТА ГІС

Кваліфікаційна робота присвячена аналізу впливу бойових дій на землекористування прифронтових територій Донецької області із застосуванням ГІС та ДЗЗ. Метою роботи є розроблення та апробація методики комплексного аналізу трансформацій землекористування за допомогою супутникових даних та інструментів ГІС.

У роботі використано знімки Sentinel-2 та індекси NDVI та NDBI для порівняння стану територій за 2020, 2022 та 2025 роки. Було застосовано платформу Google Earth Engine, що забезпечила формування композитів, розрахунок індексів та порівняння спектральних характеристик територій до та після бойових дій. Додатково виконано векторизацію району Маріуполя в QGIS, визначено пошкоджені ділянки та розраховано їх площі за 2020, 2022 та 2024 рр.

Результатом дослідження є встановлення динаміки змін, просторового розподілу пошкоджень та створення тематичних карт.

Ключові слова: дистанційне зондування, ГІС, землекористування, NDVI, NDBI, Google Earth Engine, Sentinel-2, векторизація, Маріуполь, прифронтові території.

ABSTRACT

Krul Danylo-Dmytro Volodymyrovych

Second (master's) level higher education student

specialty 193 – Geodesy and Land Management, OPP “Geodesy” of the Department of

Geodesy, Cartography, and Land Management,

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

MONITORING OF LAND USE IN THE FRONTLINE TERRITORIES OF DONETSK REGION USING REMOTE SENSING AND GIS TECHNOLOGIES

This thesis is devoted to analysing the impact of hostilities on land use in the frontline territories of Donetsk Oblast using GIS and remote sensing. The aim of the thesis is to develop and test a methodology for comprehensive analysis of land use transformations using satellite data and GIS tools.

The thesis uses Sentinel-2 images and NDVI and NDBI indices to compare the state of the territories in 2020, 2022 and 2025. The Google Earth Engine platform was used to create composites, calculate indices and compare the spectral characteristics of the territories before and after the hostilities. In addition, the Mariupol area was vectorised in QGIS, damaged areas were identified, and their areas were calculated for 2020, 2022, and 2024.

The result of the study is the establishment of the dynamics of changes, the spatial distribution of damage, and the creation of thematic maps.

Ключові слова: remote sensing, GIS, land use, NDVI, NDBI, Google Earth Engine, Sentinel-2, vectorization, Mariupol, frontline territories.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів наукових досліджень інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Д.-Д.В. Круль

Заява

Круль Данило-Дмитро Володимирович

Номер студентської книжки:

Я заявляю, що наукова робота на тему:

«Моніторинг землекористування прифронтових територій донецької області засобами ДЗЗ та ГІС»

1) Була підготовлена виключно мною, * і:

А. Не порушує авторські права третіх осіб у відповідності із законом про авторське право.

Б. Повністю або частково була використана в якості основи для отримання диплому про вищу освіту або наукового ступеня мною чи іншою особою.

2) Крім того, я заявляю, що надана мною для перевірки електронна версія роботи збігається з друкованою.

Даною заявою я підтверджую, що був проінформований про права та обов'язки студента Університету, про правила, що стосуються перевірки оригінальності наукових робіт. Тому я заявляю, що я згоден, на обробку моїх письмових робіт у відповідності з антиплагіатними процедурами Університету, а також на архівування цих робіт в базі даних інтернет системи Turnitin Similarity згідно з антиплагіатними правилами і процедурами Університету.

Я також свідомий того, що у випадку, якщо робота написана мною, за рішенням Комісії університету буде містити факти, які суперечать умовам зазначеним у цій заяві, або, якщо коефіцієнти виходять за межі гранично допустимих норм (згідно **Додатку 2**), робота буде повернута на доопрацювання.

Дата

Підпис

*Беручи до уваги істотний внесок з боку керівника наукової роботи.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1.ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ Й ОБЛІКУ ЗЕМЕЛЬ ПІД ЧАС ВІЙНИ	9
1.1. Теоретичні підходи до моніторингу землекористування у кризових ситуаціях і під час війни	9
1.2. Роль та можливості дистанційного зондування Землі під час війни	11
1.3. GIS як інструмент обліку та аналізу земельних змін у зоні бойових дій	12
Висновки до розділу 1	13
 РОЗДІЛ 2. ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГУ ЗМІН ТЕРИТОРІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ДЗЗ ТА ГІС	 15
2.1. Специфіка застосування матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для моніторингу землекористування.....	15
2.2. Аналіз ГІС-інструментарію для вирішення задач дослідження пошкоджених територій	19
2.3. Огляд функціональних можливостей програми Google Earth Engine та QGIS.....	23
Висновки до розділу 2	25
 РОЗДІЛ 3. ГІС-АНАЛІЗ ЗМІН СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ ПРИФРОНТОВОЇ ЧАСТИНИ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ.....	 27
3.1. Загальна характеристика території дослідження	27
3.2. Підготовка растрової основи	28
3.3 Процес налаштування програмного продукту Google Earth Engine та створення робочого поля.....	30

3.4 Використання індексів NDVI та NDBI для нашого дослідження та проведення аналізу пошкоджень землекористувань.....	33
3.5 Підготовка растрової основи для векторизації нової ділянки	42
3.6 Процес налаштування програмного продукту QGIS та формування векторних даних	44
3.7 Векторизація та аналіз аерокосмічних зображень.....	47
Висновки до розділу 3.....	60
ВИСНОВКИ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	63
ДОДАТКИ	67

ВСТУП

Дистанційне зондування та геоінформаційні технології і реалій сьогодення є одним із найдієвіших способів отримання даних про стан довкілля. Використовуючи космічні знімки, можна з високою точністю відстежувати зміни клімату, стан земельних ресурсів, поверхневих вод та інші аспекти. Однак для обробки та аналізу таких даних потрібні спеціалізовані програми. Одним із популярних інструментів для роботи з космічними знімками є ArcGIS.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що в тих умовах, в яких зараз знаходиться Україна виникає постійна потреба проведення моніторингу землекористувань в прифронтових регіонах для визначення руйнувань житлової та промислової інфраструктури, аналізу площ деградованих і техногенно порушених земель, провести оперативну оцінку стану сільськогосподарських угідь та зелених насаджень.

Оскільки ми маємо проблему з відсутністю повної та актуальної наземної інформації, яка необхідна для детального аналізу користувань, методи ДЗЗ стають ключовими для проведення об'єктивного аналізу.

Актуальність роботи підсилюється потребою у формуванні науково обґрунтованої основи для подальшого відновлення територій, планування землекористування та управління пошкодженими ресурсами.

Об'єктом магістерського дослідження виступає територія біля проспекту Миру і Центрального району м. Маріуполь а також інший район міста біля Драматичного театру і вулиць Миколаївської, Грецької, Митрополитської, Георгіївської і Проспекту Миру.

Предметом дослідження є вивчення можливостей використання супутникових даних Sentinel-2, індексів спектральної вегетації та геоінформаційних технологій для аналізу змін землекористування на прифронтових територіях.

Метою роботи є розроблення та апробація методики комплексного

моніторингу землекористування прифронтових територій Донецької області (на прикладі м. Маріуполь) на основі супутникових знімків Sentinel-2 та геоінформаційних технологій.

Дана мета обумовила потребу визначення та розв'язання таких **завдань**:

- проаналізувати теоретико-методологічні основи моніторингу землекористування в умовах збройного конфлікту, зокрема роль ДЗЗ та ГІС у сучасних системах спостереження;
- сформувати та підготувати супутникові дані Sentinel-2 за вибрані роки (2020, 2022, 2025) для проведення сезонних порівнянь;
- розрахувати індекси стану рослинності та урбанізованих поверхонь (NDVI, NDBI, NDWI) і виконати просторовий аналіз їх змін;
- здійснити класифікацію та векторизацію пошкоджених територій з метою визначення площ руйнувань та трансформацій землекористування;
- оцінити динаміку змін у структурі земного покриву та встановити характерні тенденції деградації, відновлення або стабільності територій.

Основними **методами дослідження** є: відбір та збір інформації; впорядкування та аналіз джерел інформації; порівняльний, літературний та картографічний методи дослідження.

Структура і обсяг роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Обсяг роботи складає 69 сторінок формату А4. Для унаочнення в роботі наявний 31 рисунок. Перелік використаних джерел складається із 37 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ Й ОБЛІКУ ЗЕМЕЛЬ ПІД ЧАС ВІЙНИ

1.1 Теоретичні підходи до моніторингу землекористування у кризових ситуаціях і під час війни

Моніторинг землекористування в умовах збройного конфлікту трансформується зі стандартної системи спостережень у складну поліструктурну систему оперативного просторового аналізу. Якщо у класичному розумінні моніторинг — це регулярна оцінка стану земель, то в кризових умовах його метою стає не лише фіксація змін, а й моделювання ризиків для екологічної та продовольчої безпеки регіону. Цей процес інтегрує аналіз природних, антропогенних та специфічних військово-техногенних факторів.

В умовах воєнного стану, зокрема на прифронтових територіях Донецької області, застосування традиційних методів (польові геодезичні вишукування, інвентаризація) стає неможливим через дію таких критичних факторів:

- *фізичну небезпеку* – безпосередню загрозу життю дослідників через активні бойові дії та артилерійські обстріли;
- *мінне забруднення*. Наявність мінних полів та нерозірваних боєприпасів (УХО) унеможлиблює безпечний фізичний доступ до земельних ділянок;
- *режимні обмеження* – закритість зон бойових дій для цивільних спеціалістів та науковців.

Зазначені обмеження детермінують перехід до безконтактного дистанційного моніторингу, де основним джерелом верифікованої інформації виступають дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Методологія базується на реєстрації змін спектральних характеристик підстильної поверхні, спричинених воєнним впливом.

Класифікація просторових змін, що ідентифікуються методами ДЗЗ:

- ✓ *механічна деградація ландшафту (Geomechanical damage)* – порушення цілісності ґрунтового покриття (кратери, вирви, траншеї, капоніри), що призводить

до трансформації мікрорельєфу та активізації ерозійних процесів;

✓ *пірогенний вплив* – поява випалених територій внаслідок бойових дій, що фіксується через теплові аномалії та зміни яскравості рослинності;

✓ *структурні зміни землекористування* охоплюють агровиробничі зміни (виведення земель з обігу, сукцесійні процеси заростання) та інфраструктурні руйнування (знищення забудови, промислових об'єктів);

✓ *хімічне забруднення* – опосередкована індикація через пригнічення рослинності токсичними продуктами вибухів та важкими металами.

Для аналізу динаміки землекористування у прифронтовій зоні застосовується набір спеціалізованих методів:

1. **Мультичасовий аналіз** (*Time-Series Analysis*). Метод базується на порівнянні часових рядів супутникових знімків за схемою «pre-war» (базовий стан) та «in-war» (поточний стан). Це дозволяє відокремити природні сезонні зміни від аномалій антропогенно-військового характеру.

2. **Спектральний індексний аналіз** дозволяє кількісно оцінити ступінь пошкодження через розрахунок спеціалізованих індексів:

- *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)* – індикатор фітосанітарного стану. Зниження значень на агроландшафтах свідчить про пошкодження або занедбання угідь;
- *NBR (Normalized Burn Ratio)* – використовує інфрачервоні діапазони для точного картування площ пожеж;
- *BSI (Bare Soil Index)* – ідентифікує ділянки оголеного ґрунту, характерні для фортифікаційних споруд та руху важкої техніки.

3. **Радіолокаційний моніторинг (SAR)**. Використання радарних даних (наприклад, Sentinel-1) є критичним в умовах хмарності та задимленості. Методи інтерферометрії та аналізу когерентності дозволяють виявляти руйнування та зміни текстури поверхні незалежно від погодних умов.

4. **Об'єктно-орієнтований аналіз (OBIA)**. Застосування алгоритмів

машинного навчання для автоматизованої сегментації території на класи: «зруйнована забудова», «пошкоджені поля», «зони активних бойових дій».

Фінальним етапом є імплементація результатів дешифрування у середовище геоінформаційних систем шляхом накладання шарів пошкоджень на кадастрову основу. Це забезпечує перехід від констатації фактів до прийняття управлінських рішень: розрахунку збитків, планування гуманітарного розмінування та визначення стратегії рекультивації земель. Враховуючи високу динаміку процесів на Донеччині, система моніторингу повинна мати циклічний характер для оцінки кумулятивного ефекту впливу. [15]

1.2 Роль та можливості дистанційного зондування Землі під час війни

В умовах повномасштабних бойових дій та тимчасової окупації частини територій дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) трансформується з допоміжного методу збору даних у безальтернативний інструмент інформаційного забезпечення землевпорядних та моніторингових процесів. Ключова роль аерокосмічних технологій у цей період полягає у подоланні «інформаційного вакууму» та фізичних бар'єрів, що унеможливають проведення наземних вишукувань. Супутникові дані забезпечують об'єктивність, глобальне охоплення та, що найважливіше, безпеку дослідників, дозволяючи дистанційно фіксувати просторові зміни на замінованих або недоступних ділянках фронту та «сірих» зон. [6]

Функціональні можливості сучасних систем ДЗЗ дозволяють вирішувати комплексні завдання з ідентифікації наслідків військового впливу завдяки поєднанню різних типів знімання. Оптико-електронні системи мультиспектрального діапазону забезпечують фіксацію змін у стані рослинного покриву та ґрунтів, дозволяючи виявляти сліди вибухів, переміщення важкої техніки та деградацію сільськогосподарських угідь через припинення їх обробітку. Водночас використання радіолокаційних даних (SAR) знімає обмеження, пов'язані з хмарністю та задимленістю, що є типовими для зон активних бойових дій, а також

дозволяє аналізувати структурні руйнування будівель та зміни мікрорельєфу за допомогою методів інтерферометрії.

Окремим вектором застосування ДЗЗ під час війни є документування екологічних та інфраструктурних злочинів. Висока роздільна здатність сучасних сенсорів дає змогу не лише констатувати факт пошкодження об'єкта, але й визначити часові рамки події, оцінити площу ураження та спрогнозувати вторинні ризики, такі як зсуви, затоплення чи поширення забруднення. Для прифронтових територій, де ландшафт зазнає стрімких геоморфологічних трансформацій (поява кратерів, фортифікаційних ліній), супутниковий моніторинг стає єдиним способом оперативного оновлення картографічної основи та оцінки придатності земель для подальшого використання.

Таким чином, технології ДЗЗ у кризових ситуаціях виступають не лише засобом спостереження, а й аналітичним базисом для прийняття управлінських рішень щодо відновлення територій. Накопичені масиви просторових даних формують доказову базу для оцінки збитків та стають основою для планування розмінування і рекультивації земель у післявоєнний період, забезпечуючи безперервність державного обліку земельного фонду навіть в умовах форс-мажорних обставин. [19]

1.3 GIS як інструмент обліку та аналізу земельних змін у зоні бойових дій

Геоінформаційні системи (ГІС) у контексті моніторингу наслідків воєнних дій виступають не лише засобом візуалізації просторових даних, а й центральною інтеграційною платформою, що забезпечує синтез різномірної інформації для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. На відміну від традиційних методів картографування, ГІС-технології дозволяють створити динамічну модель території, де дані дистанційного зондування, результати польових звітів та архівні кадастрові відомості об'єднуються в єдину координатно-часову систему. Це дозволяє перейти від простої фіксації фактів руйнувань до системного обліку

земель, забезпечуючи коректне співставлення фізичних змін ландшафту з юридичними межами земельних ділянок, що є критично важливим для збереження правової визначеності у землекористуванні під час війни.[7]

Функціональний апарат геоінформаційного аналізу надає можливості для проведення автоматизованої оцінки збитків шляхом використання методів просторової суперпозиції (overlay operations). Накладання шарів пошкоджень — таких як зони артилерійських обстрілів, фортифікаційні споруди чи сліди проходження важкої техніки — на шар публічної кадастрової карти дозволяє ідентифікувати конкретних землевласників та землекористувачів, чиї ділянки зазнали впливу. Такий підхід забезпечує точну кількісну верифікацію втрат агровиробничого потенціалу, дозволяючи розрахувати площі виведених з обігу угідь, класифікувати їх за ступенем деградації та визначити пріоритетність заходів із рекультивуації без необхідності фізичної присутності експертів на небезпечних територіях. [22]

Стратегічне значення ГІС у воєнний та післявоєнний періоди полягає також у здатності до складного просторового моделювання та районування територій за рівнем безпеки. Засоби геообробки дозволяють аналізувати щільність воронки від вибухів та локалізацію бойових зіткнень для побудови карт мінної небезпеки, які стають основою для планування гуманітарного розмінування. Таким чином, геоінформаційні системи трансформуються з інструменту обліку в аналітичну базу для відновлення регіону, дозволяючи розробляти сценарії подальшого використання земель — від консервації техногенно забруднених ділянок до відновлення інфраструктури — спираючись на точні математичні розрахунки та просторову логіку. [26]

Висновки до розділу 1

В умовах війни моніторинг землекористування перетворюється зі стандартної системи спостережень на складну, поліструктурну систему оперативного просторового аналізу, метою якої є не лише фіксація змін, а й моделювання ризиків

для екологічної та продовольчої безпеки. Традиційні методи моніторингу, такі як польові геодезичні вишукування, стають неможливими на прифронтових територіях через фізичну небезпеку, мінне забруднення та режимні обмеження.

За таких умов ДЗЗ стає безальтернативним інструментом інформаційного забезпечення, що долає фізичні бар'єри та забезпечує безпеку дослідників. Його методи (мультитимовий аналіз, спектральний індексний аналіз, радіолокаційний моніторинг) дозволяють класифікувати просторові зміни, спричинені війною, такі як механічна деградація, пірогенний вплив, структурні зміни та хімічне забруднення.

Технології ДЗЗ та ГІС забезпечують аналітичний базис для прийняття управлінських рішень. Накопичені дані формують доказову базу для оцінки збитків, планування гуманітарного розмінування, та визначення стратегії рекультивації земель у післявоєнний період [28]

РОЗДІЛ 2. ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГУ ЗМІН ТЕРИТОРІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ДЗЗ ТА ГІС

2.1. Специфіка застосування матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для моніторингу землекористування

Стрімка еволюція технологій супутникового моніторингу відкрила доступ до колосальних масивів даних ДЗЗ, що характеризують стан земної поверхні. Це стало потужним поштовхом для розвитку методів ідентифікації та класифікації ґрунтового покриву. На сучасному етапі всі матеріали супутникового зондування прийнято класифікувати на дві ключові категорії, залежно від використовуваного ділянки електромагнітного спектра: оптичні знімки та дані радіолокаційної зйомки.

Оптичне дистанційне зондування

Даний тип зйомки вирізняється високою просторовою роздільною здатністю, завдяки чому оптичні зображення є незамінним інструментом у багатьох сферах. Вони широко застосовуються для:

- виявлення змін у структурі землекористування;
- моніторингу стану рослинності;
- задач містобудування та планування територій;
- екологічного моніторингу та археологічних досліджень.

Технологічно отримання оптичних даних здійснюється за допомогою спеціалізованих датчиків — камер, спектрометрів та мультиспектральних сканерів. Ці прилади працюють у діапазонах видимого світла та інфрачервоного випромінювання.

Оптичне зондування є пасивним методом отримання даних. Це означає, що формування зображення повністю залежить від зовнішнього джерела освітлення (сонячного світла), що накладає певні обмеження на час та умови зйомки.

Радіолокаційне дистанційне зондування (SAR). Для отримання високоякісних зображень земної поверхні в цьому сегменті використовується

технологія радіолокатора із синтезованою апертурою (діафрагмою) — РЛС. Саме такі радары встановлюються на сучасних супутниках для спостереження за Землею.

В ідеальній теоретичній моделі система дистанційного зондування повинна бути спроектована так, щоб забезпечувати виявлення будь-яких трансформацій земної поверхні з максимально необхідними параметрами спектральної, просторової та часової роздільної здатності, а також під оптимальними кутами огляду. Проте в реальних умовах експлуатації виникає низка технічних і фізичних обмежень. Практичні проблеми, що стосуються фізичних характеристик сенсорів, а саме їх спектральної чутливості, просторової деталізації, частоти зйомки та геометрії спостереження, а також складнощі інтеграції різнорідних даних, створюють суттєві перешкоди для платформ дистанційного зондування у задачах точної ідентифікації та характеристики змін земельних угідь. [21]

Спектральні обмеження та особливості. Фізична сутність дистанційного зондування базується на тому, що електромагнітне випромінювання різних діапазонів (видимого, ближнього інфрачервоного, короткохвильового інфрачервоного, теплого та мікрохвильового) по-різному взаємодіє з наземними об'єктами: воно поглинається, відбивається або пропускається матеріалами земної поверхні. Будь-які зміни ландшафту, по суті, є результатом часткової або повної заміни одних матеріалів іншими, що призводить до зміни їхніх спектральних сигнатур. Відповідно, конкретний тип змін на місцевості може демонструвати різні характеристики виявлення залежно від довжини хвилі, на якій ведеться спостереження. На практиці це означає, що якщо діапазони сенсора не налаштовані на специфічні спектральні відмінності між двома станами земної поверхні, стає майже неможливим не лише визначити локалізацію та час змін, але й ідентифікувати природу об'єкта, кількісні метрики та причини трансформації [5].

Часові аспекти моніторингу. Поняття часової роздільної здатності системи ДЗЗ визначається періодичністю повторних прольотів супутника над однією і тією ж ділянкою (період ревізиту). Наприклад, для супутника Landsat 8 цей інтервал

становить 16 діб. Сучасні системи моніторингу варіюються за частотою зйомки: від щохвилинних та щогодинних спостережень до щоденних, щотижневих, щомісячних або навіть річних циклів [5]. Фундаментальним є правило: чим вища часова роздільна здатність, тим точніше можна зафіксувати момент настання змін, оскільки часове вікно події звужується. Це підтверджується ефективністю алгоритмів виявлення змін, які базуються на аналізі щільних часових рядів даних, що дозволяє мінімізувати невизначеність у датуванні подій.

Вплив кутових характеристик зйомки. Енергія, що реєструється датчиками ДЗЗ, має специфічні кутові властивості, які описуються двонаправленою функцією розподілу відбиття (BRDF). Ці характеристики є функцією кута падіння джерела освітлення (Сонця для пасивних оптичних систем або сигналу радара для активних систем) та кута візування самого сенсора. Анізотропна природа відбиття призводить до того, що той самий об'єкт може мати різні спектральні яскравості залежно від умов зйомки. Це створює неузгодженість між даними, отриманими одним і тим самим сенсором у різний час, та ускладнює моделювання поверхневого відбиття, що, в свою чергу, обмежує можливості виділення реального корисного сигналу змін на фоні шумів, спричинених геометрією зйомки [4].

Обмеження супутникового сегмента ДЗЗ. Безперечно, супутникове зондування має вагомі переваги, серед яких відносно низька вартість отримання даних на одиницю площі, глобальне покриття та наявність тривалих архівів спостережень, що робить його ключовим інструментом для аналізу землекористування. Однак існує низка суттєвих обмежень. До них належать лімітована просторова і часова роздільна здатність, висока чутливість до атмосферних перешкод (хмарність, аерозолі), обмеження спектральної та радіометричної чутливості, а також потенційні помилки при автоматизованій класифікації та інтерпретації. Додатковими бар'єрами є вартість доступу до комерційних даних високої точності та складність обчислювальних процедур обробки великих масивів інформації. Для забезпечення валідності результатів

необхідне застосування ретельних підходів до попереднього відбору знімків, методів їх корекції та верифікації отриманих даних [3].

Проблематика виявлення змін у реальному часі. На сьогоднішній день існує дефіцит надійних методів, здатних виявляти зміни поверхні в режимі реального часу, при цьому ефективно нівелюючи вплив фенологічної динаміки. Фенологічні фактори — сезонна вегетація, погодні умови, цикли розвитку рослин — суттєво впливають на яскравість, спектральні характеристики та текстуру зображень, що може призвести до хибного виявлення змін (псевдозмін). Ця проблема є критичною для задач екологічного моніторингу, управління природними ресурсами та оцінки наслідків стихійних лих. Перспективним шляхом вирішення є комплексна інтеграція різномірних джерел даних: поєднання мультиспектральних і гіперспектральних знімків з метеорологічними даними та інформацією про ґрунти. Такий підхід дозволяє сформувати глибоке розуміння того, як змінюються характеристики поверхні під впливом сезонних та погодних факторів, і, як наслідок, точно відокремлювати природні фенологічні коливання від антропогенних або катастрофічних змін ґрунтового покриття [5].

Синтез даних ДЗЗ різної роздільної здатності. Окремим напрямом підвищення ефективності моніторингу є комбінування зображень з різними характеристиками. Зображення з **високою просторовою роздільною здатністю** забезпечують високу деталізацію, дозволяючи фіксувати дрібномасштабні об'єкти: окремі будівлі, елементи дорожньої мережі, деревну рослинність. Це критично важливо для задач містобудування та точного екологічного моніторингу, оскільки дозволяє виявляти мікрозміни, такі як розширення забудови або локальна вирубка дерев. Однак такі дані характеризуються великими обсягами, що вимагає значних обчислювальних потужностей для зберігання та обробки. Крім того, частота отримання високодетальних знімків зазвичай є нижчою, а їх вартість — вищою, що обмежує їх використання в задачах оперативного моніторингу [25].

На противагу цьому, знімки з **низькою та середньою роздільною здатністю**

є оптимальними для глобального та регіонального моніторингу великих територій. Вони зазвичай мають високу частоту повторної зйомки, що робить їх незамінними для сільського господарства та метеорології, де важлива динаміка процесів. Економічна ефективність таких даних також є вищою. Головним недоліком є ефект "змішаного пікселя", коли дрібні деталі та зміни втрачаються або усереднюються в межах одного елемента зображення. Для гетерогенних ландшафтів низька роздільна здатність може не забезпечити достатньої диференціації об'єктів.

Отже, розробка та впровадження алгоритмів ефективного об'єднання (fusion) даних дистанційного зондування з різною просторовою та часовою роздільною здатністю є ключовим фактором для підвищення точності та інформативності методів аналізу змін землекористування у майбутніх дослідженнях [5].

2.2. Аналіз ГІС-інструментарію для вирішення задач дослідження пошкоджених територій

Фундаментальним призначенням геоінформаційних систем (ГІС) є забезпечення повного циклу роботи з просторовими даними: від їх акумуляції, структурування та опрацювання до зберігання, редагування та фінальної візуалізації. Саме поняття «система» в цьому контексті підкреслює інтеграційну роль, яка об'єднує різноманітні компоненти в єдиний функціональний механізм.

З технічної точки зору, ГІС являє собою комплекс спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволяє трансформувати бази даних з географічною прив'язкою у наочні картографічні моделі. Завдяки візуалізації просторової інформації на картах з'являється можливість для глибокого аналізу певної території та розуміння процесів, що на ній відбуваються, що є критично важливим для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

У сфері землекористування та моніторингу ґрунтового покриття методи просторового аналізу та ГІС-технології виступають потужним аналітичним інструментом. ГІС надає можливості для генерації карт динаміки, що візуалізують

трансформації у землекористуванні та стані рослинного покриву протягом досліджуваного періоду. Це дозволяє чітко диференціювати території, які зазнали суттєвих змін, від тих, що зберегли відносну стабільність ландшафту.

Важливим вектором застосування геоінформаційних систем є ідентифікація рушійних факторів, що провокують зміни у землекористуванні та структурі ґрунтового покриву. До таких чинників належать процеси урбанізації, розширення аграрних площ, наслідки військових дій або стихійних лих. Розуміння цих причинно-наслідкових зв'язків є необхідним для стратегічного планування, управління земельними ресурсами та формування ефективної політики розвитку територій.

Окрім ретроспективного аналізу, функціонал ГІС дозволяє розробляти прогностичні моделі майбутньої еволюції ландшафтів. Це дає змогу завчасно виявляти зони ризику та враховувати потенційні загрози при плануванні, а також відкриває можливості для оцінки екологічних наслідків трансформації територій, зокрема впливу на якість водних ресурсів, інтенсивність ерозійних процесів і втрату біорізноманіття [9].

Просторовий аналіз має низку суттєвих переваг у задачах класифікації земної поверхні, що робить його незамінним інструментом дослідження. Застосування вдосконалених методів класифікації сприяє підвищенню точності розпізнавання об'єктів ґрунтового покриву, забезпечуючи комплексне охоплення території та оперативність картографування. Це, у свою чергу, мінімізує складнощі в інтерпретації даних та заощаджує час дослідника. Інтеграція даних із декількох джерел дозволяє створювати цілісні карти, що надають системне уявлення про досліджувані явища.

Водночас, просторовий аналіз стикається з певними викликами при класифікації поверхні. Висока гетерогенність типів земного покриву – від щільної міської забудови до водних об'єктів та лісових масивів – часто вимагає залучення складних алгоритмів та технологій штучного інтелекту. Критичним фактором

залишається якість та роздільна здатність вхідних даних: низька деталізація може призвести до помилок класифікації. Окрім того, моніторинг змін у режимі реального часу є складним завданням, яке потребує безперервної актуалізації та верифікації моделей, що використовуються для аналізу [9].

Далі доцільно проаналізувати конкретні програмні продукти ГІС, які є релевантними для виконання поставлених у дослідженні завдань:

ArcGIS від компанії Esri. Цей програмний комплекс є одним із лідерів на ринку комерційних ГІС і надає користувачам вичерпний інструментарій для вирішення задач просторового аналізу високого рівня складності, таких як мережевий аналіз, геостатистичне моделювання та геообробка великих масивів даних. Система забезпечує інтегрований доступ до розгалужених бібліотек даних та попередньо налаштованих геопросторових моделей, що значно підвищує ефективність вилучення корисної інформації з просторових даних.

Ключові особливості:

1) **управління даними.** ArcGIS характеризується наявністю надійних та розвинених інструментів для структурування, редагування та організації баз даних. Програмне забезпечення забезпечує підтримку широкого спектра форматів, включаючи растрові зображення, векторні об'єкти та табличні масиви. Це гарантує можливість ефективного адміністрування та інтеграції гетерогенних наборів даних у єдиному середовищі;

2) **просторовий аналіз.** Платформа пропонує розширений функціонал для проведення аналітичних операцій. Дослідники мають змогу виконувати такі процедури, як формування складних просторових запитів, аналіз близькості (proximity analysis), оверлейні операції, геообробку та аналіз рельєфу місцевості. Зазначені можливості дозволяють виявляти приховані закономірності та отримувати нові знання на основі просторових взаємозв'язків;

3) **картографування та візуалізація.** Потужні картографічні модулі ArcGIS дозволяють створювати високоякісні карти та інтерактивні моделі, що відповідають

сучасним стандартам візуалізації. Система надає гнучкі налаштування символіки, інструментів анотування та дизайну макетів. Це сприяє ефективній комунікації результатів дослідження, роблячи складні просторові дані зрозумілими для кінцевого користувача [9].

QGIS (Quantum GIS) – це потужна геоінформаційна система з відкритим вихідним кодом (Open Source), яка за своїм функціоналом складає гідну конкуренцію комерційним аналогам. Вона надає дослідникам широкий спектр інструментів для просторового аналізу, управління геоданими та картографування. Важливою перевагою QGIS є кросплатформеність, підтримка численних форматів даних та можливість безшовної інтеграції з іншими відкритими геопросторовими бібліотеками та плагінами. [36]

Ключові особливості:

1) *можливості геообробки*. QGIS пропонує розгалужений набір алгоритмів геообробки, що охоплює методи просторової статистики, глибокий аналіз векторних та растрових даних, перевірку топологічної коректності та мережевий аналіз. Такий інструментарій дозволяє реалізовувати складні просторові операції та отримувати аналітичні висновки високої точності.

2) *картографія та візуалізація*. Система володіє розвиненими засобами картографічного дизайну, що дає змогу готувати картографічні матеріали професійної якості. Користувачам доступні різноманітні інструменти для маркування об'єктів та налаштування компоновки карт. Окрім статичних карт, QGIS дозволяє створювати динамічні інтерактивні візуалізації та анімації, що є важливим для презентації часових змін та результатів моніторингу територій [10].

Google Earth Engine (GEE) – це хмарна платформа для геопросторового аналізу планетарного масштабу, яка докорінно змінює підходи до обробки супутникових даних. На відміну від традиційних настільних ГІС, GEE використовує обчислювальні потужності серверів Google для обробки та аналізу величезних масивів інформації, що робить її незамінним інструментом для

моніторингу змін довкілля та пошкоджених територій у глобальному та регіональному масштабах.

Ключові особливості:

1) *доступ до глобального архіву даних.* GEE надає миттєвий доступ до багатопетабайтного каталогу супутникових знімків та геопросторових наборів даних. Сюди входять повні архіви місій Landsat, Sentinel, MODIS, а також дані про клімат, рельєф, ґрунтовий покрив та атмосферні показники. Це позбавляє дослідника необхідності завантажувати та зберігати величезні обсяги даних локально.

2) *високопродуктивні хмарні обчислення.* Платформа дозволяє виконувати складні алгоритми обробки зображень та просторового аналізу паралельно на тисячах комп'ютерів у хмарі Google. Це дозволяє скоротити час обробки даних з днів або тижнів до хвилин або секунд, що є критично важливим при аналізі великих територій або часових рядів за кілька десятиліть.

3) *інструменти розробки та аналізу.* GEE пропонує зручні інтерфейси прикладного програмування (API) на мовах JavaScript та Python. Це дозволяє дослідникам створювати власні алгоритми класифікації, розробляти моделі машинного навчання для виявлення змін земної поверхні та створювати інтерактивні веб-додатки для візуалізації результатів дослідження без необхідності розгортання власної серверної інфраструктури [11].

2.3 Огляд функціональних можливостей програми Google Earth Engine та QGIS

Дізнаємось більше про програму Google Earth Engine, яку ми будемо використовувати для аналізу землекористувань території Маріуполя.

В даній програмі (див. рис. 2.1) ми маємо змогу шляхом написання коду працювати з картою і аналізувати супутникові знімки.

В верхній частині екрану зліва розміщені збережені робочі файли, об'єкти, які

знаходяться в нашому теперішньому файлі і набір скриптів, що можуть допомогти в виконанні поставлених задач.

Посередині видно консоль, в яку пишеться необхідний для виконання конкретної задачі код, де після написання шляхом натискання на клавішу “Run”, код починає працювати.

В правій панелі видно помилки, що не дозволять виконати код, щоб виконавець знав як їх виправити, а також в панелі ‘Tasks’ будуть збережені файли, гістограми і т.д, які ми прописали в свій код. [31]

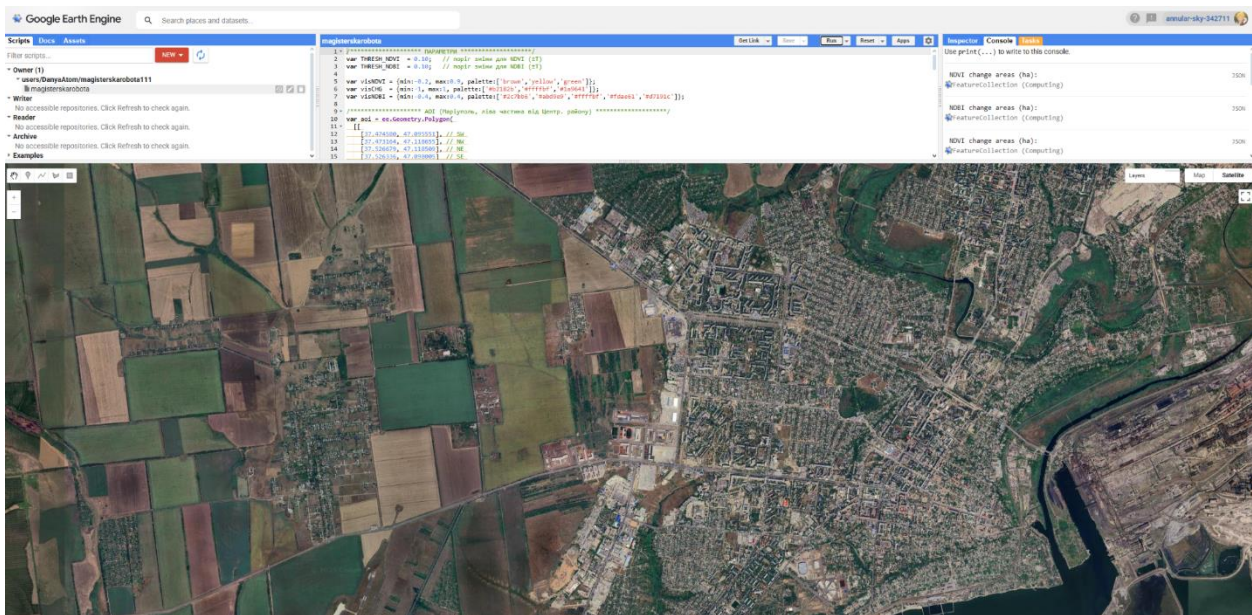


Рис. 2.1. Робоче поле програми Google Earth Engine

В ході виконання нашої роботи з цим програмним середовищем ми будемо працювати із растровими зображеннями (аерофотознімками), і будемо створювати векторні об’єкти (точки, лінії, полігони), які відповідатимуть за зображення сільськогосподарських територій, будівель і т.д.

Програму QGIS ми будемо використовувати для векторизації пошкоджень територій і аналізу просторово-часових змін за задані роки (див. рис. 2.2).

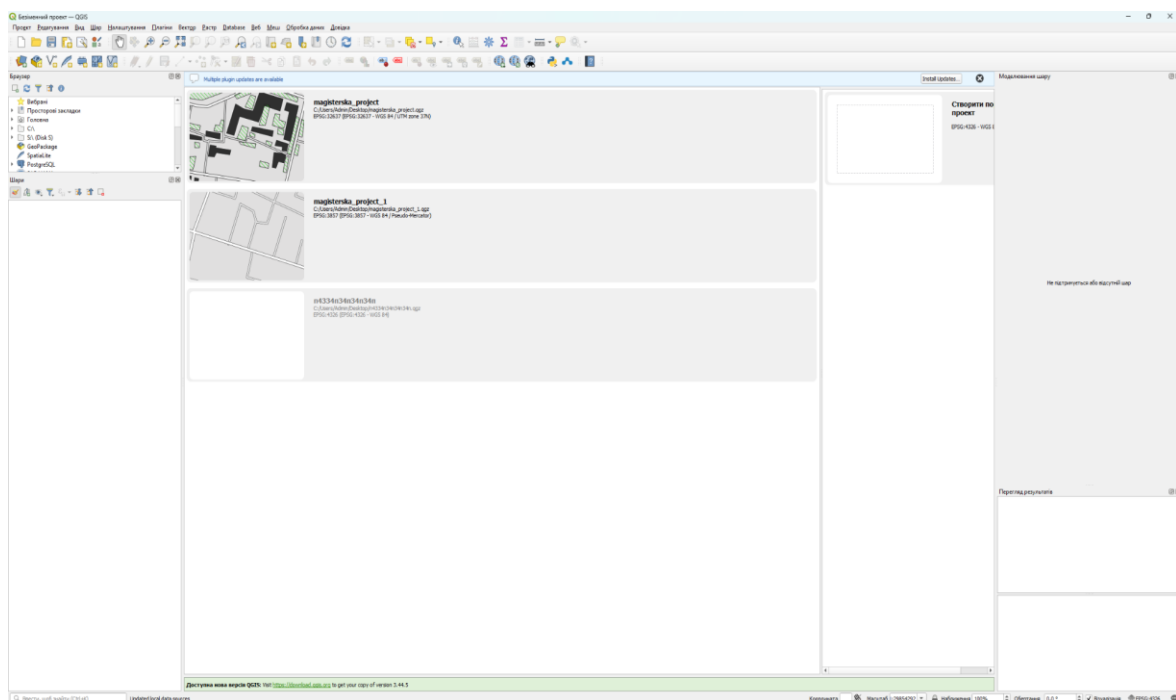


Рис. 2.2. Робоче поле програми QGIS

Таким чином, для реалізації комплексного моніторингу змін землекористування та оцінки пошкоджень територій, спричинених військовими діями, необхідно застосовувати інтегрований підхід, що поєднує можливості високопродуктивної хмарної платформи Google Earth Engine для аналізу масштабних масивів супутникових даних і QGIS для точної векторизації та детального просторово-часового аналізу.

Висновки до розділу 2

Отже, геоінформаційні системи (ГІС) забезпечують повний цикл роботи з просторовими даними: від акумуляції та структурування до аналізу та фінальної візуалізації картографічних моделей. Просторовий аналіз у ГІС є потужним аналітичним інструментом для генерації карт динаміки, ідентифікації рушійних чинників (включаючи наслідки військових дій) та розробки прогностичних моделей еволюції ландшафтів.

У дослідженні визначено три ключові програмні продукти:

ArcGIS, що використовується для високоскладного просторового аналізу та

управління базами даних; QGIS (Open Source) – для геообробки, картографії та, зокрема, буде використана для векторизації пошкоджень та просторово-часового аналізу; Google Earth Engine (GEE) (хмарна платформа) – для аналізу планетарного масштабу завдяки миттєвому доступу до багатопетабайтного архіву супутникових даних та високопродуктивним хмарним обчисленням. Ця платформа буде використана для аналізу землекористувань території Маріуполя. [30]

РОЗДІЛ 3. ГІС-АНАЛІЗ ЗМІН СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ ПРИФРОНТОВОЇ ЧАСТИНИ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

3.1. Загальна характеристика території дослідження

Маріуполь – місто в Україні на півдні Донецької області на березі Азовського моря у гирлі річки Кальміусу. Адміністративний центр Маріупольської міської громади і Маріупольського району.

Геометрія аналізу (АОІ) охоплює територію на захід від Жовтневого/Центрального району Маріуполя (див. рис. 3.1), яка використовується російською владою для створення пропаганди і ілюзії відновлення міста. Площа $\approx 46,599$ км². Населення району до війни: у джерелах згадується цифра близько 179 582 осіб для Центрального району.

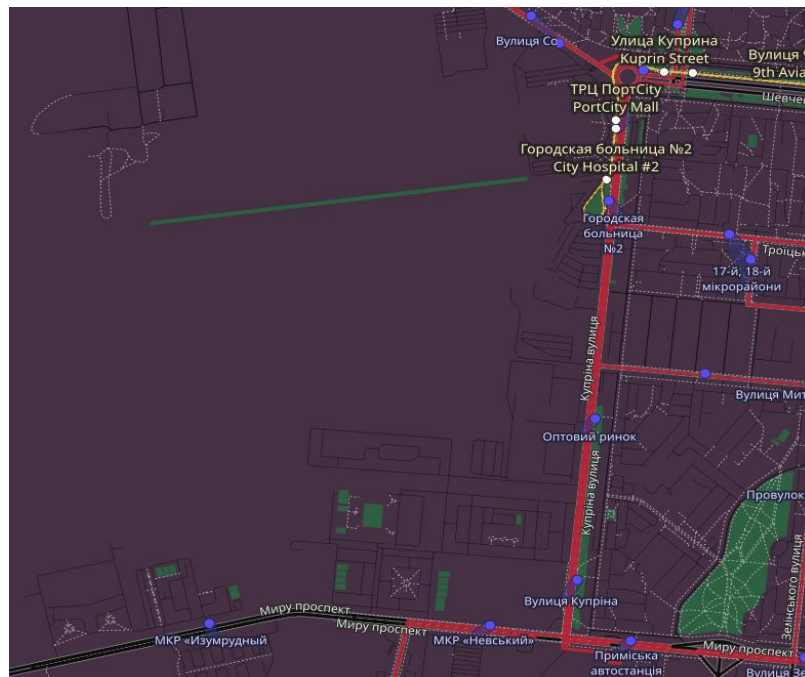


Рис. 3.1. Територія дослідження (частина району Центральний)

До повномасштабного вторгнення росії у самому Центральному районі, як найбільш центральній частині міста з великою концентрацією адміністративних, комерційних, житлових майданчиків, соціальна інфраструктура була добре розвинена: бібліотеки, культурні установи, магазини, транспорт. [24]

Після початку повномасштабного вторгнення росії на територію України, Центральний район був захоплений в короткі терміни тому він отримав значно менші пошкодження ніж райони, які знаходяться ближче до промислової зони міста Маріуполь. Саме тому він і є основним для створення картинки “відновлення” міста і був обраний нами для проведення аналізу пошкоджень сільськогосподарських угідь і інших ділянок.

3.2 Підготовка растрової основи

Для виконання завдання ми будемо використовувати різні супутникові знімки та функціонал програми Google Earth Engine:

1. Сучасний супутниковий знімок високої роздільної здатності території дослідження (див. рис. 3.2), завантажений в сервіс Google Earth Engine, який був зроблений за допомогою супутника Махаг [8].



Рис. 3.2. Сучасний супутниковий знімок частини району Центральний і території біля проспекту Миру

2. Архівні супутникові знімки високої роздільної здатності території дослідження (2020 та 2022 роки), завантажений в сервіс Google Earth Engine, який був зроблений за допомогою супутника Махаг (рис. 3.3).



Рис. 3.3. *Архівні супутникові знімки частини району Центральний і території біля проспекту Миру (2020 і 2022 роки) [8]*

3. Сучасний супутниковий знімок низької роздільної здатності завантажений в сервіс Google Earth Engine, який був зроблений за допомогою супутника Махаг для проведення подальшого дослідження землевпорядкувань за допомогою технологій NDVI, та NDBI (використовувались дані з сенсора Landsat [8]).

Для аналізу рослинності будемо використовувати технологію NDVI, NDBI в програмі Google Earth Engine. NDVI використовується для кількісної оцінки зеленого кольору рослинності і є корисним для розуміння щільності рослинності та оцінки змін у стані здоров'я рослин. [33]

NDVI розраховується, як співвідношення між значеннями червоного (R) та ближнього інфрачервоного (NIR) спектрів традиційним способом:

$$(NIR - R) / (NIR + R)$$

У Landsat 8-9 NDVI = (Band 5 - Band 4) / (Band 5 + Band 4).

NDBI (Normalized Difference Built-up Index) — це індекс, який використовується для виявлення щільно забудованих територій на супутникових знімках. Його часто застосовують у містобудівному аналізі, картографуванні урбанізації, моніторингу змін забудови та теплових островів у містах.

$$NDBI = (SWIR + NIR) / (SWIR - NIR)$$

3.3. Процес налаштування програмного продукту Google Earth Engine та створення робочого поля

Особливістю роботи з додатком Google Earth Engine є те, що створення робочого поля, вставлення супутникових знімків і проведення аналізу відбувається за допомогою написання правильного коду.

Для початку з використанням сервісу Google Maps потрібно визначити координати чотирьох точок (див. рис. 3.4), які будуть використовуватись для меж нашого робочого поля (aoi).

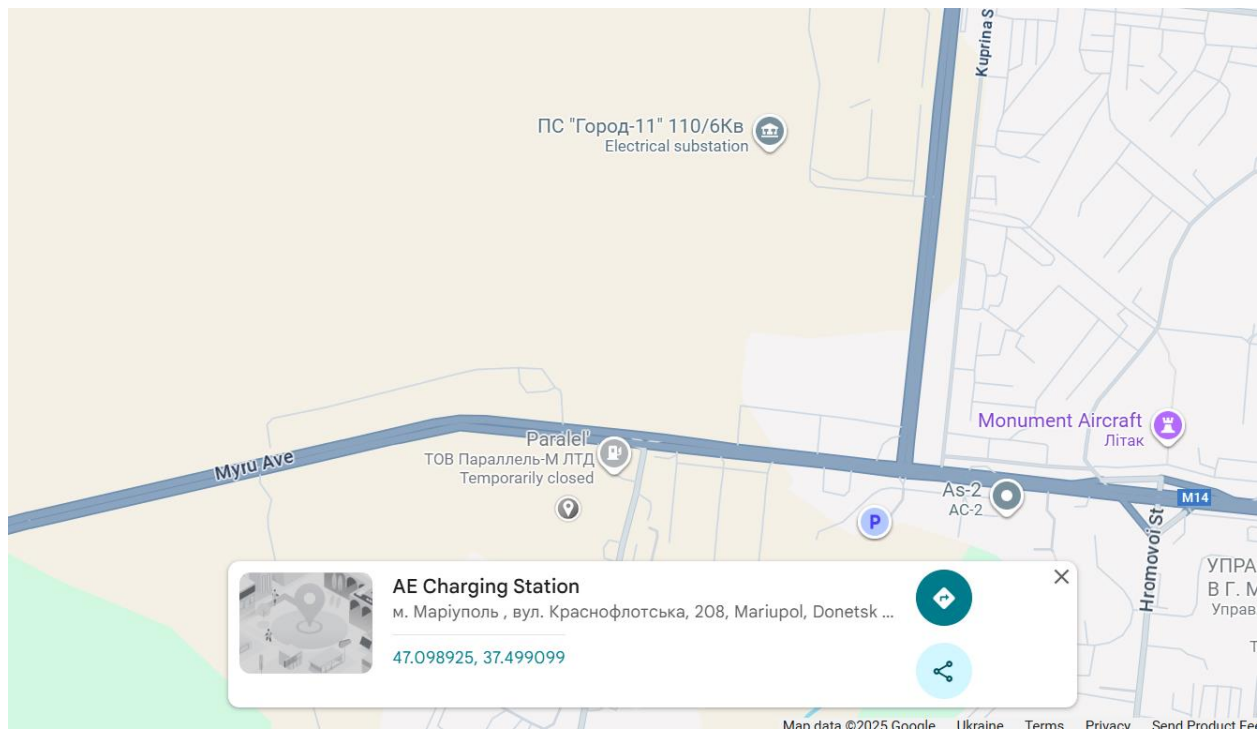


Рис 3.4. Визначення координат точки для створення робочого поля

За допомогою коду нам необхідно задати координати чотирьох точок нашої території дослідження (див. рис. 3.5). Це важливий процес, оскільки подальший пошук супутникових знімків території залежить від того, чи правильно ми визначили її координати.

```
Link 6c11b3a0ba0080047dc22aaacfb96e19 *
1
2 var aoiPoints = [
3   [37.474580, 47.095551], // кут 1 (Донецька)
4   [37.473164, 47.118655], // кут 2 (Купріна / кільце Т0803)
5   [37.526679, 47.118509], // кут 3 (просп. Миру М14, схід)
6   [37.526336, 47.098005] // кут 4 (просп. Миру М14, захід/край поля)
7
8 ];
9
10
11 var aoi = ee.Geometry.Polygon([aoiPoints], null, false);
12
13
14 Map.setOptions('SATELLITE');
15 Map.centerObject(aoi, 14);
16 Map.addLayer(aoi, {color: 'red'}, 'AOI');
17
18
19 print('AOI geometry:', aoi);
```

Рис. 3.5. Код для створення робочої ділянки

Після введення коду натискаємо на кнопку 'Run' і програма Google Earth Engine починає побудову робочого поля відповідно до заданих координат (див. рис. 3.6).



Рис. 3.6. Побудоване робоче поле, в якому проводитиметься дослідження

За допомогою попередньо написаного коду, який ми внесли в Google Earth Engine, починаємо пошук супутникових знімків Landsat-2 території нашого дослідження за 2020, 2022 та 2025 роки. Щоб врахувати можливу хмарність на знімках, ми відбираємо найкращий варіант для нас за період вегетації за часовий

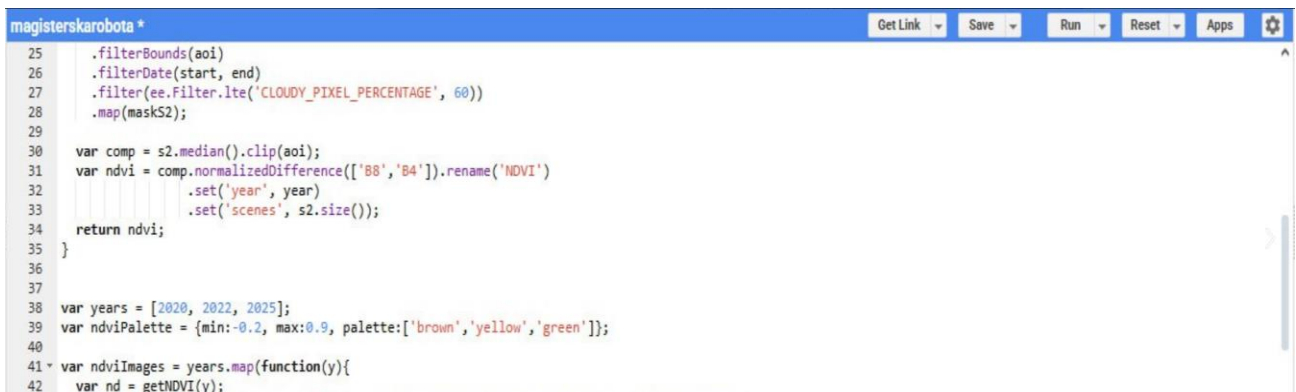
проміжок травень-липень. Як результат, ми отримуємо необхідні нам супутникові знімки за 2020, 2022 та 2025 роки для того, щоб ми могли проводити наше дослідження (див. рис. 3.7). [13] [14]



Рис. 3.7. Супутникові знімки які будуть використовуватись для дослідження

3.4. Використання індексів NDVI та NDBI для нашого дослідження та проведення аналізу пошкоджень землекористувань

Далі за допомогою коду ми починаємо додавання показників NDVI за 2020, 2022, 2025 рік на нашу робочу область (див. рис. 3.10). Ми прописуємо параметри, за допомогою яких буде показано ділянки з низькою, середньою і високою рослинністю.



```
25 .filterBounds(aoi)
26 .filterDate(start, end)
27 .filter(ee.Filter.lte('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 60))
28 .map(maskS2);
29
30 var comp = s2.median().clip(aoi);
31 var ndvi = comp.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI')
32   .set('year', year)
33   .set('scenes', s2.size());
34 return ndvi;
35 }
36
37
38 var years = [2020, 2022, 2025];
39 var ndviPalette = {min:-0.2, max:0.9, palette:['brown','yellow','green']};
40
41 var ndviImages = years.map(function(y){
42   var nd = getNDVI(y);
```

Рис. 3.8. Код для використання NDVI

Також ми прибираємо хмари, туман і атмосферні артефакти і залишаємо лише рослинність, ґрунт, водні об'єкти, щоб забезпечити коректний NDVI без хмарних пікселів. Також ми обрали однакове вегетаційне вікно для всіх років (25 травня – 10 липня). На основі отриманих композитів буде виконано розрахунок статистичних характеристик NDVI (середнє, медіана, дисперсія, мін/макс), побудовано гістограми розподілу та здійснено візуалізацію індексу в межах полігону (нашого робочого поля). [15]

Після цього ми запускаємо наш код і в результаті отримуємо три супутникових знімки з автоматично порахованим індексом NDVI, де червоний (помаранчевий) колір = $NDVI < 0,2$ відповідає техногенним або ж оголеним поверхням з мінімальною або ж відсутньою рослинністю, жовтий колір = $NDVI 0,2 - 0,4$ і відповідає слабко розвиненій або деградованій рослинності (відповідає

пошкодженим полям або ділянкам з низькою вологістю), світло-зелений колір = 0,4 - 0,7 і вище відповідає ділянкам з активною зеленою біомасою (див. рис. 3.9).

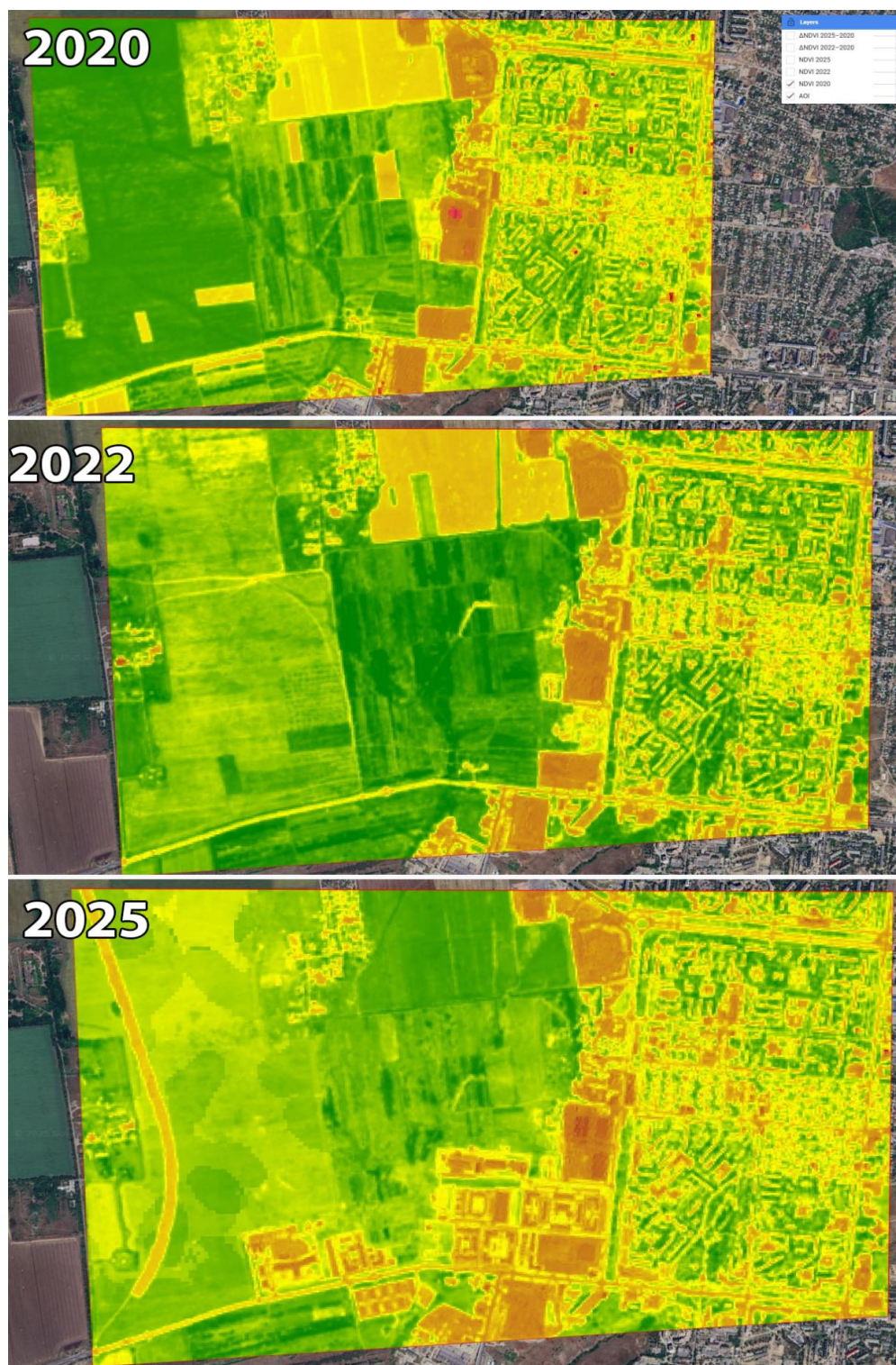


Рис. 3.9. NDVI за роками дослідження

Далі було написано код, для того, щоб проаналізувати зміни NDVI для досліджуваної ділянки в Маріуполі за три роки (2020, 2022, 2025). Для цього потрібно відкинути хмарні пікселі і щільні хмари (відкинувши супутникові знімки з хмарністю більшою за 60%), а також враховувати лише класи рослинності, ґрунту, забудованих земель і т.д. [32]

Червоний колір позначатиме втрату рослинності, оголення ґрунту, пошкодження с/г площ, занедбані поля, пожежі, технічні укріплення, вирви. Зелений колір – нові посіви, відновлення полів, заростання територій. Світло-жовтий / салаточий – буде позначати мінімальні зміни, стабільну рослинність або стабільно низькі значення. Темно-червоні масиви відображатимуть масштабне порушення землекористування – ймовірно у результаті бойових дій або зміни агровиробництва.

Дані карти (див. рис. 3.10, 3.11) – це $\Delta\text{NDVI} = \text{NDVI}(\text{пізніше}) - \text{NDVI}(\text{раніше})$. Було отримано NDVI 2022-2020 для аналізу оперативних наслідків після початку повномасштабної війни і NDVI 2025-2020, щоб побачити накопичений ефект наслідку бойових дій. [23]

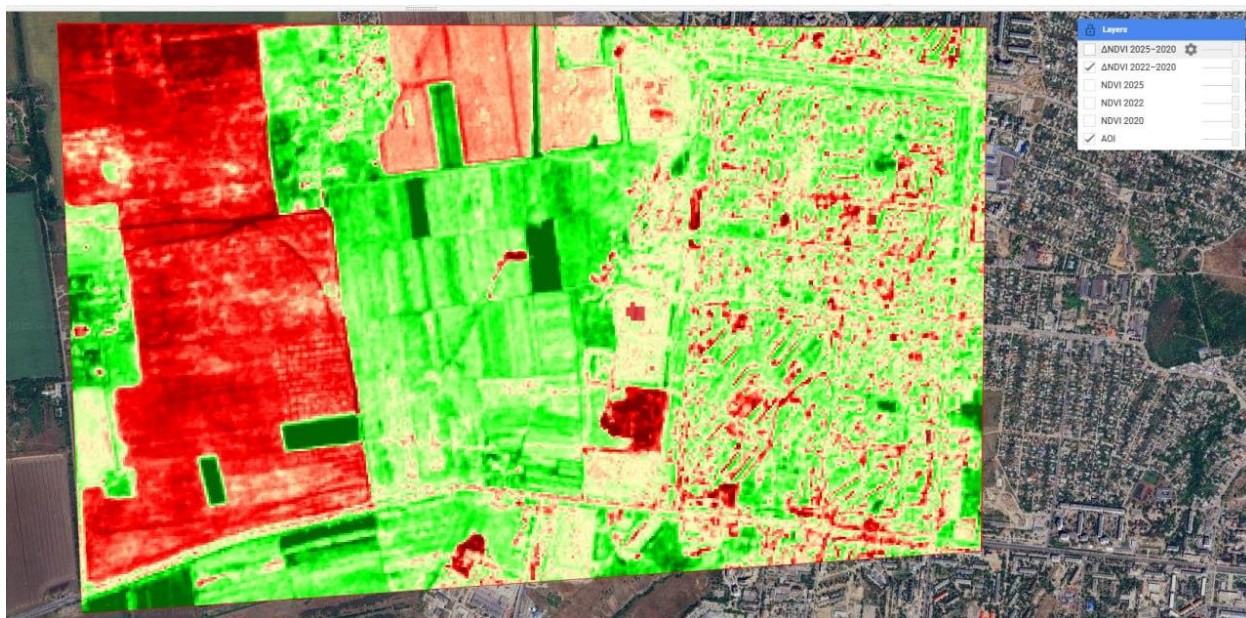


Рис. 3.10. Різниця NDVI за 2022-2020 роки

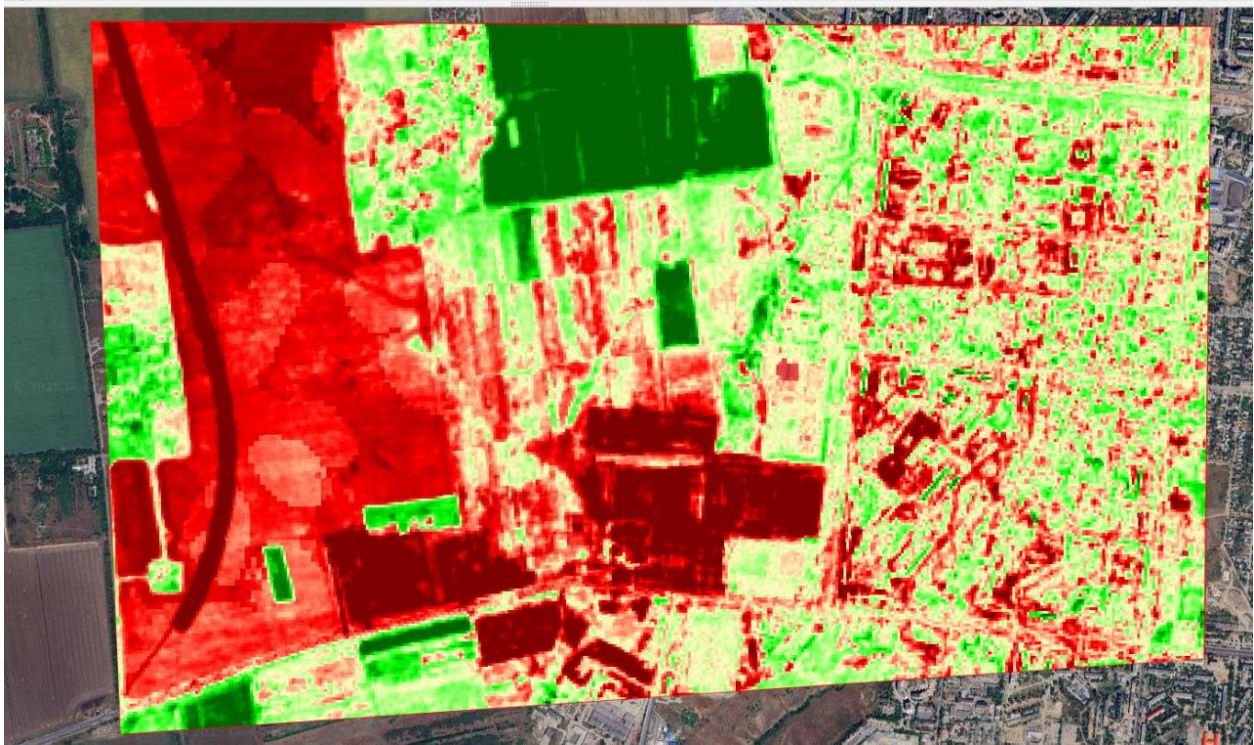


Рис. 3.11. Різниця NDVI за 2025-2020 роки

Було проведено аналіз знімків і розрахунки для аналізу впливу бойових дій і кількість деградованих, відносно стабільних (земель які отримали незначні пошкодження) і покращених (землі які зазнали змін за роки) в гектарах і було отримано наступні показники:

За аналізом NDVI 2022-2020: Загальна площа земель на території дослідження становить 968,95 гектарів, показник деградованих земель становить 232,85 гектари, відносно стабільних – 485,77 гектарів, земель, які стали покращеними – 250,32 гектара.

За аналізом NDVI 2025-2020: Загальна площа земель на території дослідження становить 968,95 гектарів, показник деградованих земель становить 382,02 гектари, відносно стабільних – 446,42 гектарів, земель, які стали покращеними – 140,42 гектарів. [37]

Також були створені гістограми аналізу показників NDVI по пікселях за роками дослідження (див. рис. 3.12).

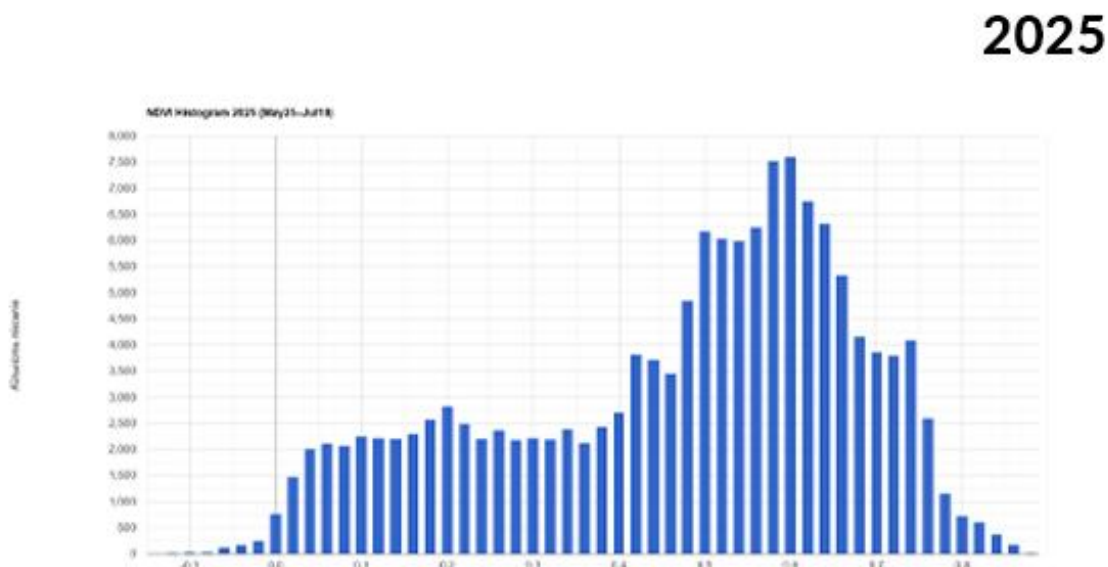
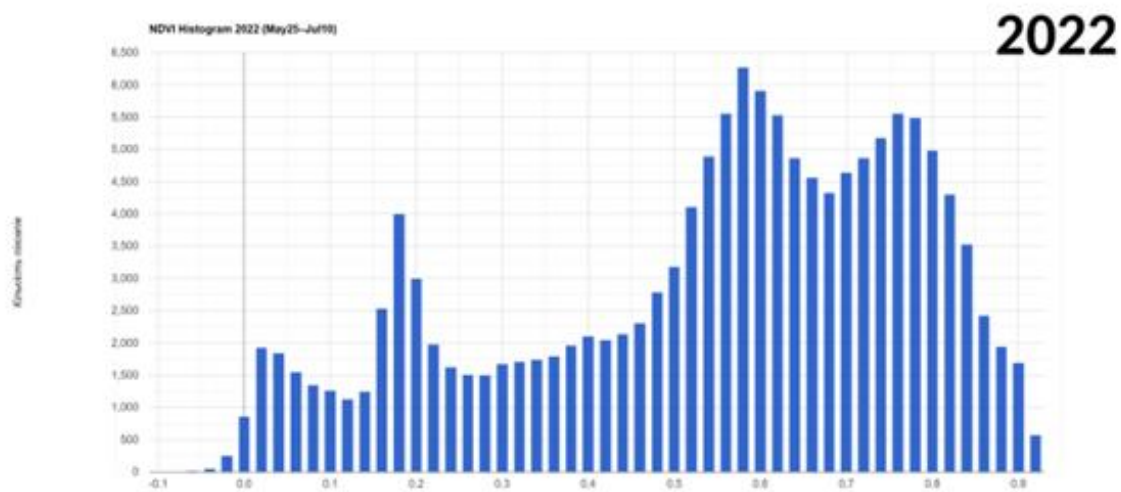
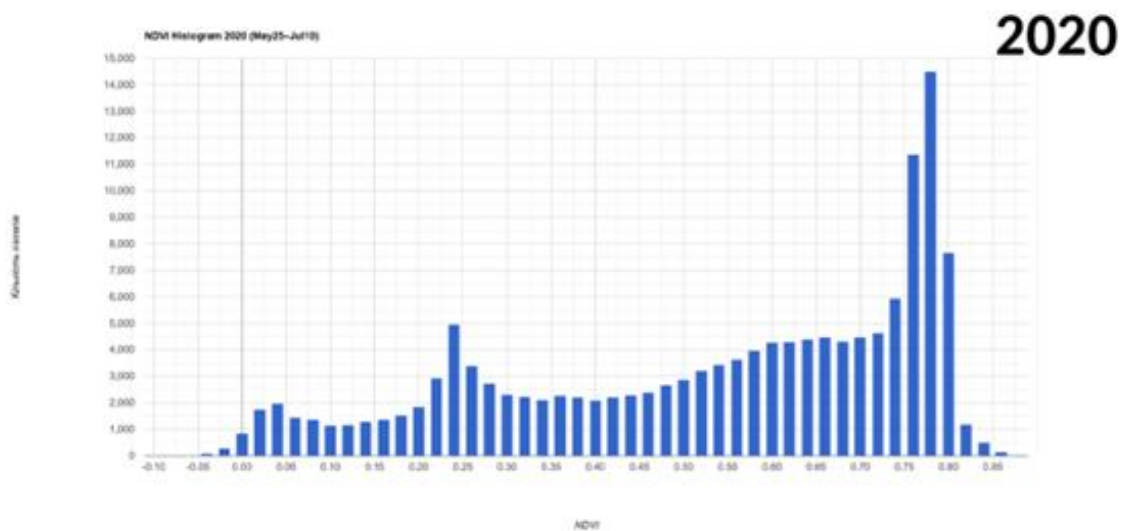


Рис. 3.12. Гістограма показників NDVI за роками дослідження

Проаналізуємо дані гістограм: **2020** (базовий стан). Гістограма має чіткий правобічний пік у 0,70–0,80 NDVI, що типово для активної літньої вегетації. Частка низьких значень ($\text{NDVI} < 0,20$) — мінімальна. Середнє значення за вибіркою: $\text{NDVI} \approx 0,54$, медіана $\approx 0,61$. Це свідчить про стабільний, рівномірно продуктивний стан с/г угідь і зелених насаджень.

2022 (активна фаза бойових дій). Пік розподілу зміщується у 0,55–0,65 NDVI, зростає маса лівого плеча (0,10–0,30). Середнє $\approx 0,55$, медіана $\approx 0,60$. Незважаючи на близьке до 2020 середнє, форма гістограми вказує на появу сегментів із зниженим NDVI (оголений ґрунт, пошкоджені або невчасно оброблені поля, ділянки після пожеж/вибухів). Високі $\text{NDVI} > 0,75$ представлені гірше.

2025 (накопичений ефект). Розподіл зміщується ще лівіше: домінує 0,45–0,60 NDVI, частка $\text{NDVI} < 0,30$ зростає помітно. Середнє $\approx 0,48$, медіана $\approx 0,53$. Верхній «здоровий» хвіст ($\text{NDVI} > 0,75$) майже зникає. Це ознака системної деградації рослинності та/або тривалого занепаду агровиробництва. [17]

У 2022-2025 роках зростає масив $\text{NDVI} < 0,30$, характерний для оголеного ґрунту/порушених площ (вирви, ґрунтові дороги/укріплення, занедбані поля).

Площа класу «погіршилось» помітно збільшується у 2025 порівняно з 2022, просторово такі осередки тяжіють до периферій сільськогосподарських полів, уздовж інженерних ліній і на ділянках можливих пожеж/розорювання. Клас «без суттєвої зміни» зберігається переважно на ділянках тривалої пасовищної/перелогової рослинності або житлової забудови з постійною рослинністю дворів, де сезонний сигнал відносно стабільний. Частка пікселів із $\text{NDVI} > 0,75$ суттєво скорочується (у 2025 році — епізодична), що означає втрату ділянок із максимальною продуктивністю. [16] [33]

Далі перейдемо до використання NDBI, попередньо перед цим написавши код, в якому задаємо прорахунок NDBI за 2020, 2022, 2025 роки відповідно до вказаних часових рамок. Після цього ми отримуємо знімки за 2020, 2022 та 2025

роки з показником NDBI, на яких ми можемо провести наш аналіз.

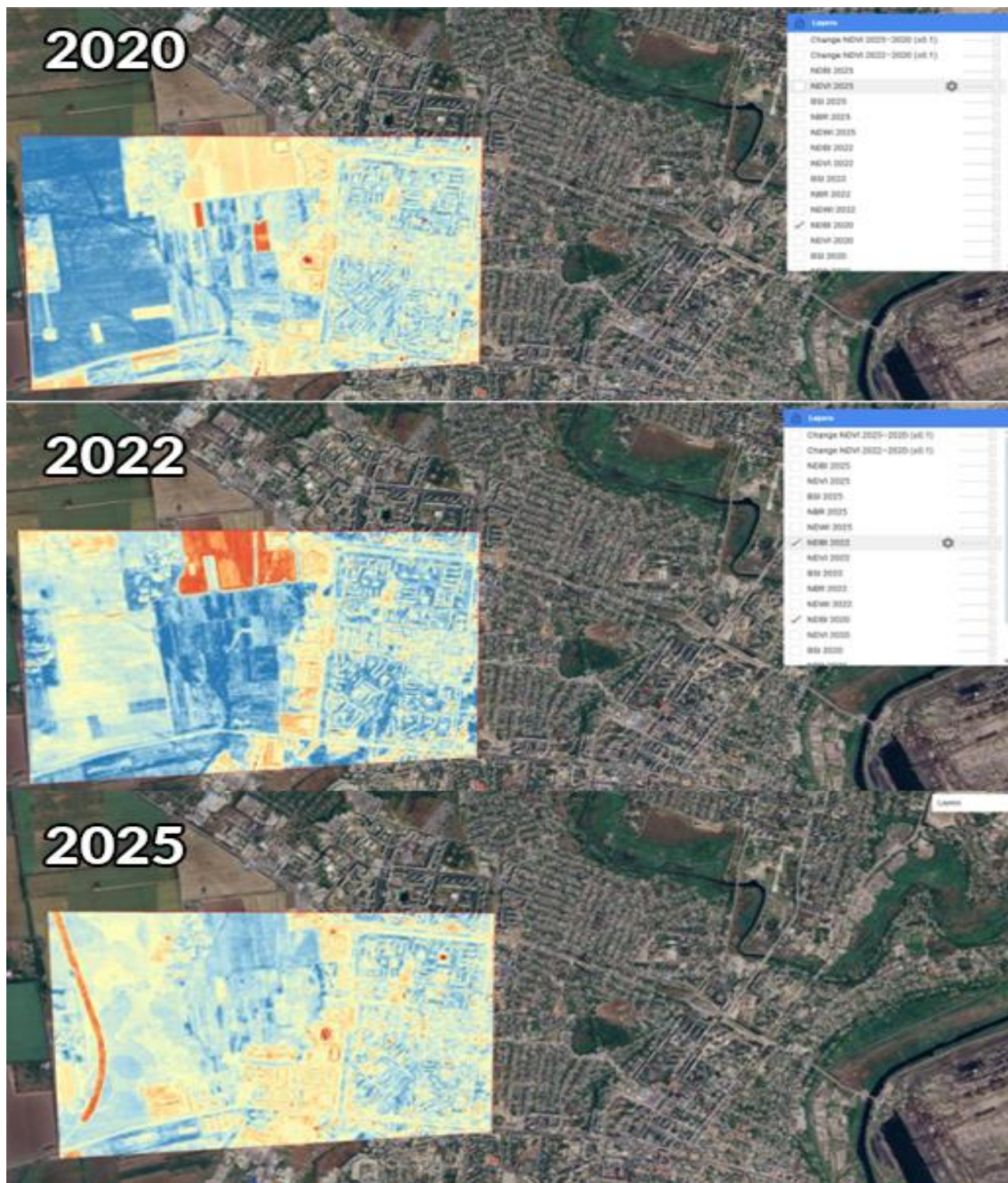


Рис. 3.13. Індекс NDBI за роками дослідження

Було проведено аналіз знімків і розрахунки для аналізу впливу бойових дій і кількість деградованих, відносно стабільних (земель, які отримали незначні

пошкодження) і покращених земель (які зазнали змін за роки) в гектарах і було отримано наступні показники.

За аналізом NDBI 2022-2020 – загальна площа земель на території дослідження становить 968,95 гектарів, показник деградованих земель – 272,26 гектари, відносно стабільних земель – 410,15 гектарів, земель, які стали покращеними, виявилось 271,53 гектари.

За даними аналізу NDBI 2025-2020 – загальна площа земель по території дослідження становить 968,95 гектарів, показник деградованих земель – 115,28 гектарів, відносно стабільних – становить 519,85 гектарів, земель, які стали покращеними, – 333,81 гектари.

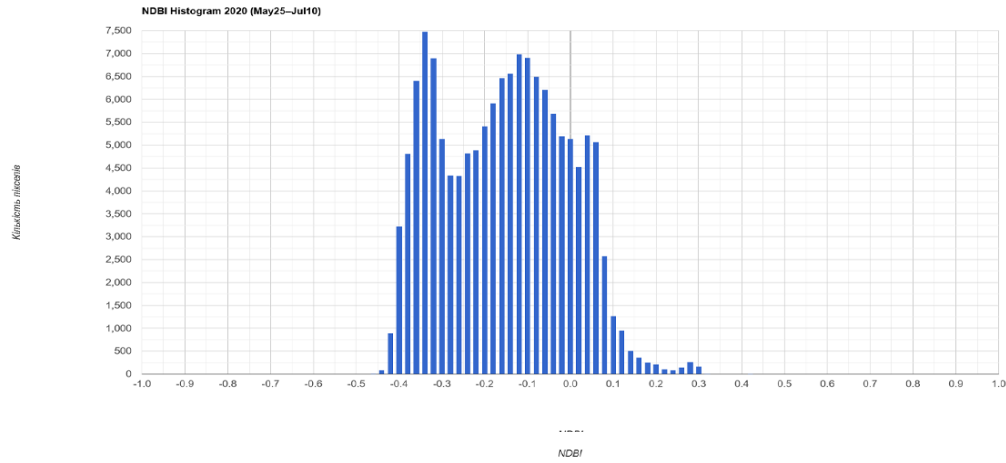
Також нами були отримані гістограми для аналізу показників пошкоджень по NDBI за 2020, 2022 та 2025 роки (див. рис. 3.14).

Гістограма за **2020** рік має виражений лівобічний розподіл із піком у діапазоні $-0.25 \dots -0.15$, що відповідає домінуванню рослинних та ґрунтових поверхонь. Частка значень $NDBI > 0$ майже відсутня, що підтверджує низьку урбанізованість і відсутність великих техногенних об'єктів. Середнє значення $NDBI \approx -0.145$, медіана ≈ -0.139 , що є типовим для аграрно-рослинного ландшафту з мінімальним втручанням техногенного покриву. Позитивні значення NDBI трапляються точково на інфраструктурних об'єктах (будівлі, дороги), але їхня частка не впливає на загальний розподіл.

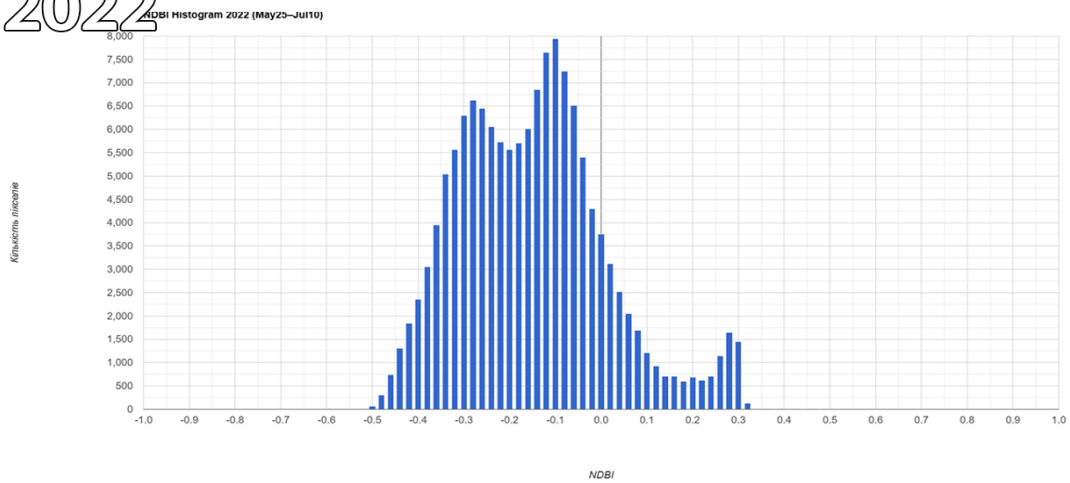
2022 (активна фаза бойових дій). Пік гістограми зміщується до $-0.20 \dots -0.10$, що супроводжується помітним вирівнюванням кривої та появою більшої кількості пікселів у зоні $-0.10 \dots 0.00$. Середнє значення зростає до ≈ -0.140 , але дисперсія збільшується, що відображає фрагментарні зміни покриву. Характер зміни кривої свідчить не про урбанізацію, а про появу оголених техногенних поверхонь, пов'язаних із руйнуванням об'єктів, пожежами, переміщенням техніки, створенням укріплень і траншей. Зона $NDBI > 0$ починає проявлятися частіше, однак у вигляді розрізнених пікселів — це характерно не для нової забудови, а для пошкоджених

територій, де рослинність втрачена, а ґрунт ущільнений або засипаний будівельними матеріалами. [20]

2020



2022



2025

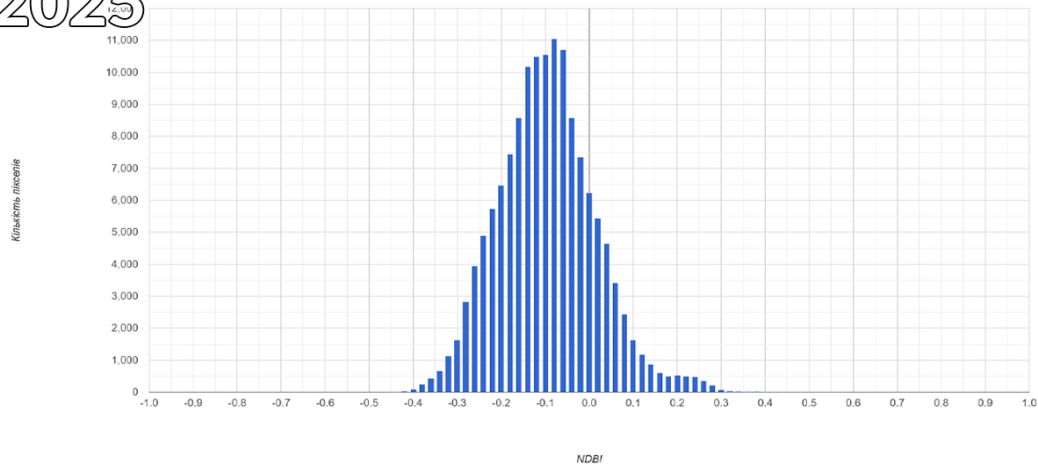


Рис. 3.14. Гістограма показників NDBI

2025 (накопичений техногенний ефект). Гістограма за 2025 рік демонструє найсуттєвіший зсув. Основна частина розподілу перебуває у $-0.15 \dots 0.05$, а кількість пікселів із $NDBI > 0$ зростає майже вдвічі порівняно з 2022 роком. Середнє значення підвищується до ≈ -0.085 , медіана до ≈ -0.090 , тобто з'являються великі площі без рослинності, що мають спектральні властивості техногенного покриття. Високі значення $NDBI > 0.15$, які у 2020 році були практично відсутні, тепер формують окремий хвіст розподілу, це території із щільною змішаною техногенною поверхнею: бетон, асфальт, руїни, оголений гравійний шар, щебеневі насипи, зруйновані об'єкти інфраструктури.

3.5 Підготовка растрової основи для векторизації нової ділянки

Для виконання завдання ми будемо використовувати різні супутникові знімки та OpenStreetMap.

1. Сучасний супутниковий знімок високої роздільної здатності району міста Маріуполь біля Театрального скверу і Митрополитської, Миколаївської, Грецької і Георгіївської вулиць (див. рис. 3.15), викачаний з сервісу Google Earth Pro, який був зроблений за допомогою супутника Махаг [8].



Рис. 3.15. Сучасний супутниковий знімок району міста Маріуполь біля Театрального скверу і Митрополитської, Миколаївської, Грецької і Георгіївської вулиць

2. Архівні супутникові знімки високої роздільної здатності району міста Маріуполь біля Театрального скверу і Митрополитської, Миколаївської, Грецької і Георгіївської вулиць (2020 та 2022 роки), викачвні з сервісу Google Earth Pro, який був зроблений за допомогою супутника Махар (див. рис. 3.16).



Рис. 3.16. Архівний супутниковий знімок району міста Маріуполь біля Театрального скверу і Митрополитської, Миколаївської, Грецької і Георгіївської вулиць

3. Також буде використовуватись додатковий веб-сервіс безпосередньо в програмі ArcMap, а саме карта OpenStreetMap (див. рис. 3.17).

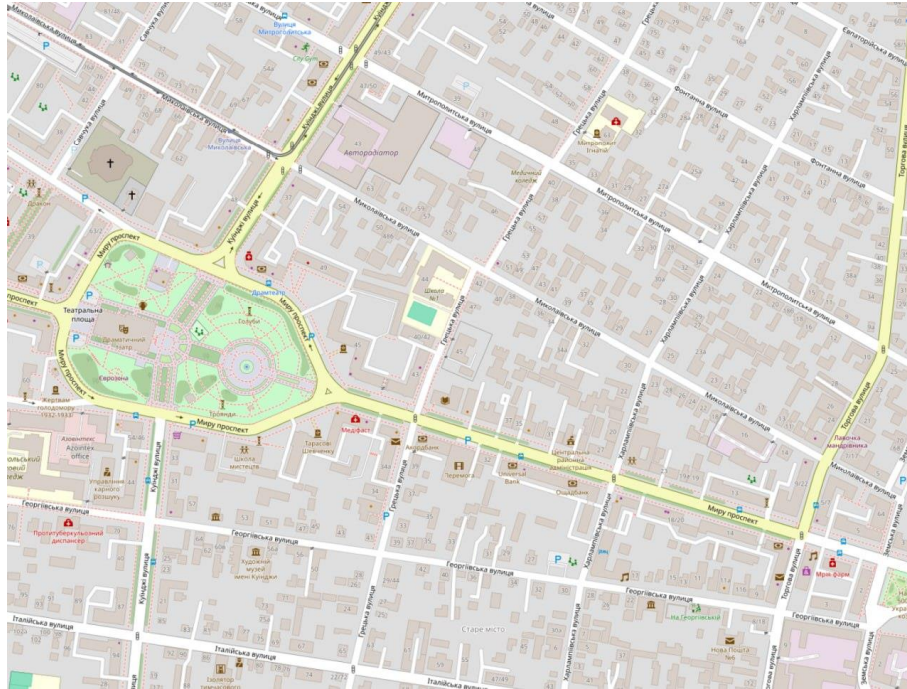


Рис. 3.17. Веб-ресурс (карта OpenStreetMap) [12]

4. Можливе використання різних фотоархівів (Google Street)

Для аналізу площ пошкоджених, вцілілих і відновлених територій лісистості та забудови ми будемо використовувати формулу \$area в таблиці атрибутів програми Quantum Gis.

3.6 Процес налаштування програмного продукту QGIS та формування векторних даних

Візьмемо три супутникових знімки території району міста Маріуполь біля Театрального скверу і Митрополитської, Миколаївської, Грецької і Георгіївської вулиць, які ми попередньо отримали і викачали за допомогою геопорталу GoogleEarth Pro.

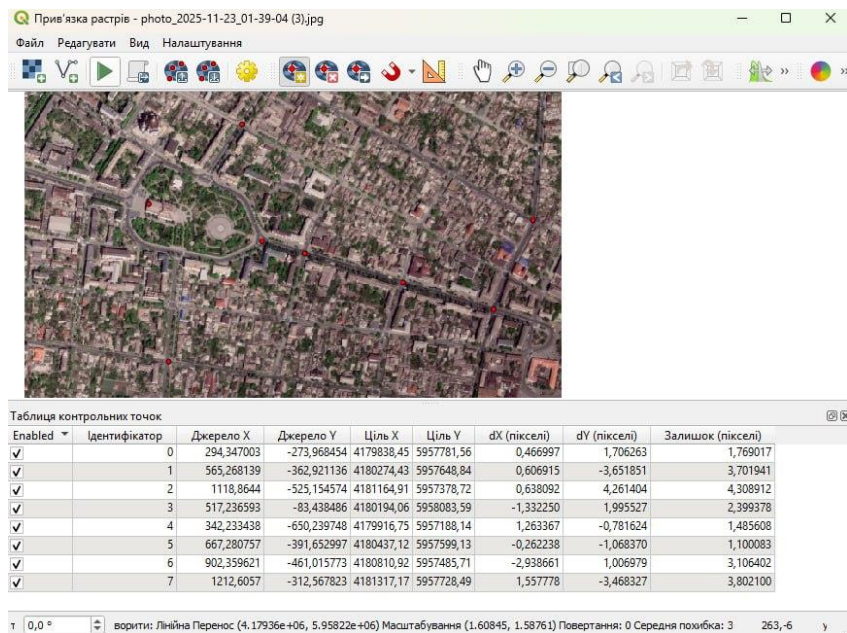


Рис. 3.18. Використання вкладки Georeferencing

Імпортуємо дані знімки в програмне середовище QGIS, попередньо встановивши для проєкту систему координат WGS 84.

Оскільки знімки, взяті з Google Earth Pro не мають реальної геоприв'язки, ми повинні зробити її вручну, використовуючи функціонал програми QGIS.

Використовуючи вкладку Прив'язка растрів (див. рис. 3.18), ми по ключових точках трьох знімків (2020, 2022 та 2024 років) пов'язали їх із нашою картою OpenStreet Map, щоб надалі виконувати завдання. Для цього було використано сталі орієнтири, такі як перехрестя, великі будівлі і кути вулиць оскільки потрібно враховувати те, що об'єкти можуть зазнавати змін внаслідок війни і потрібно використовувати те, що буде найпростіше ідентифікувати на усіх супутникових знімках для нашої геоприв'язки. [34]

Всі три знімки були геоприв'язані по однакових точках відносно карти Open Street Map, після чого можна переходити до початку створення об'єктів для векторизації.

Тепер можна почати наносити об'єкти на наші супутникові знімки.

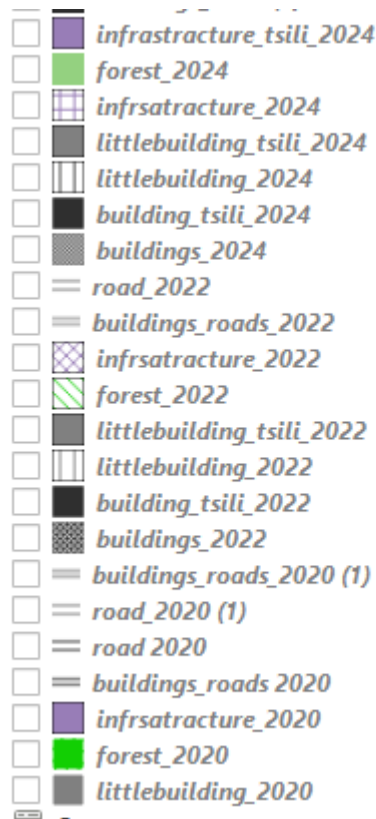


Рис. 3.19. Умовні позначення для певних типів об'єктів

За допомогою функції Створити Шар 'GeoPackage' формуємо векторні шари, які відповідатимуть певним типам об'єктів, які нас цікавлять:

- дороги;
- багатоповерхівки;
- 1-2 поверхові будинки;
- інфраструктурні будівлі та будівлі іншого типу;
- багаторічні насадження, чагарникова рослинність;
- введено спеціальні умовні позначення для пошкоджених територій будинків і лісистій території.

Далі можна переходити до процесу векторизації оскільки ми вже провели всю необхідну підготовчу роботу для цього.

3.7 Векторизація та аналіз аерокосмічних зображень

Головною метою дослідження є аналіз змін змелекористування на території району міста Маріуполь біля Театрального скверу і Митрополитської, Миколаївської, Грецької і Георгіївської вулиць. Ми будемо порівнювати знімки за 2020, 2022 та 2024 рік, щоб побачити зміни, яких зазнав район дослідження під час бойових дій і що відбулось вже після того, як місто Маріуполь залишилось в окупації і активно використовується для проведення пропагандистських робіт.

Почнімо з векторизації і аналізу дорожньої мережі району дослідження. Було створено 2 лінійні шари, кожен з яких буде відповідати дорозі із:

- твердим асфальтовим покриттям, із шириною проїжджої та пішохідної частин понад 7 метрів;
- ґрунтовим та гравійним покриттям (міжбудинкова територія)

Порівнюючи зображення (див. рис. 3.20), можна помітити, що на знімках 2020 та 2022 року немає суттєвих змін і дорожній покрив не постраждав. Якщо порівнювати знімки 2020 і 2024 року, або знімки 2022 та 2024 року видно, що вагома частина міжбудинкових доріг ‘зникла’. Пізніше ми побачимо що це сталось через те, що значна частина будівель внаслідок бойових дій знищена, і відповідно прибудинкові території не доглядаються і дороги заросли рослинним покривом або деревами. [35]

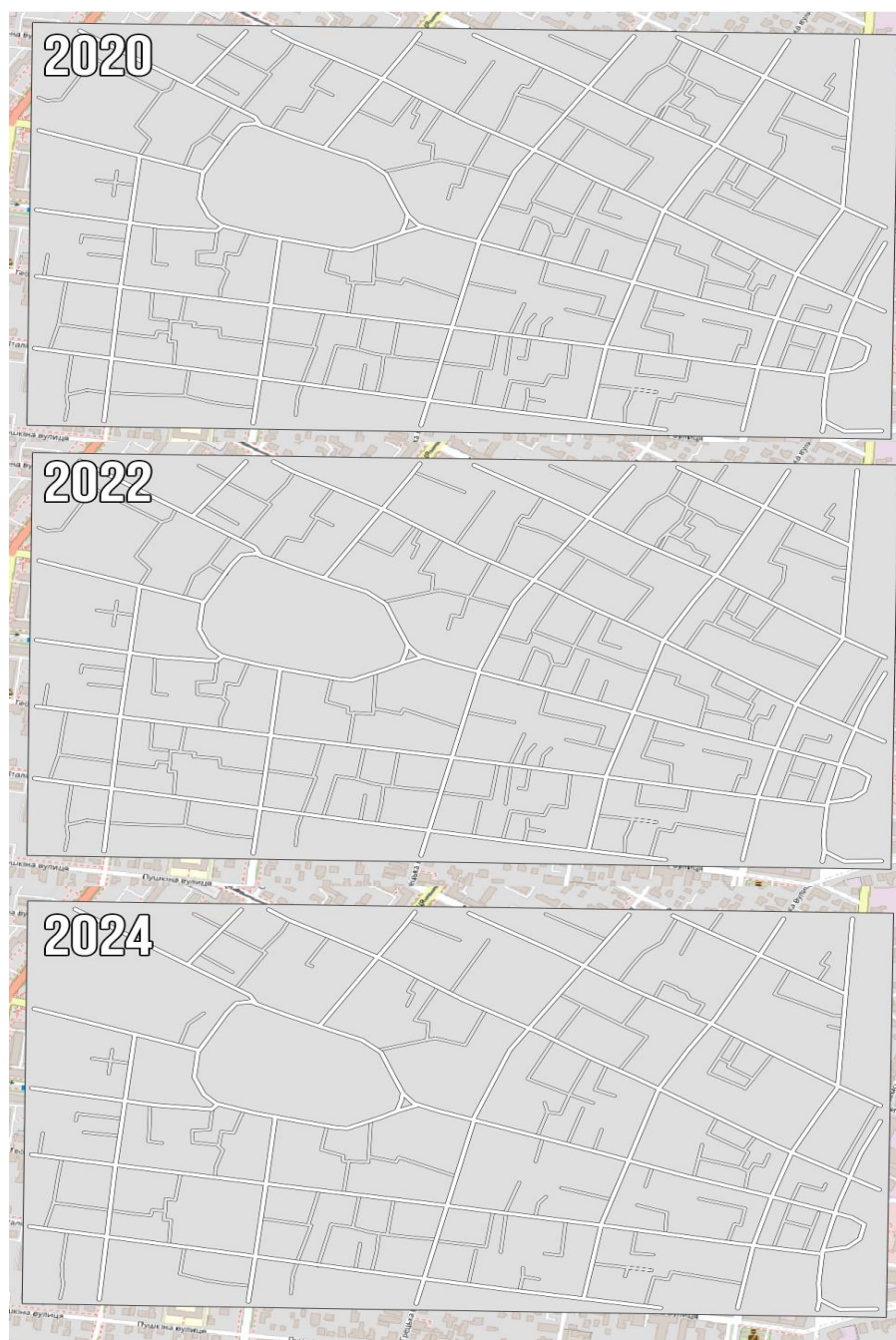


Рис. 3.20. Векторизація шару доріг

Далі ми векторизували багатоповерхівки і звичайні будинки, а також нанесли пошкоджені будівель внаслідок візуального аналізу супутникових знімків. Є два варіанти виконання подібних робіт: вручну або з використанням можливостей функціоналу програми QGIS.

Розглянемо виконання роботи в QGIS на прикладі звичайних будинків.

Для цього нам необхідно векторизувати цілі звичайні будинки в 2020, 2022 та 2024 роках і задати їм однакову систему координат, щоб не виникало ніяких помилок при перевірках. Після того, як дані об'єкти було векторизовано, ми можемо скористатись інструментом 'Векторне накладання - Різниця', основна функція якого полягає в порівнянні кількості об'єктів заданих шарів (див. рис. 3.21).

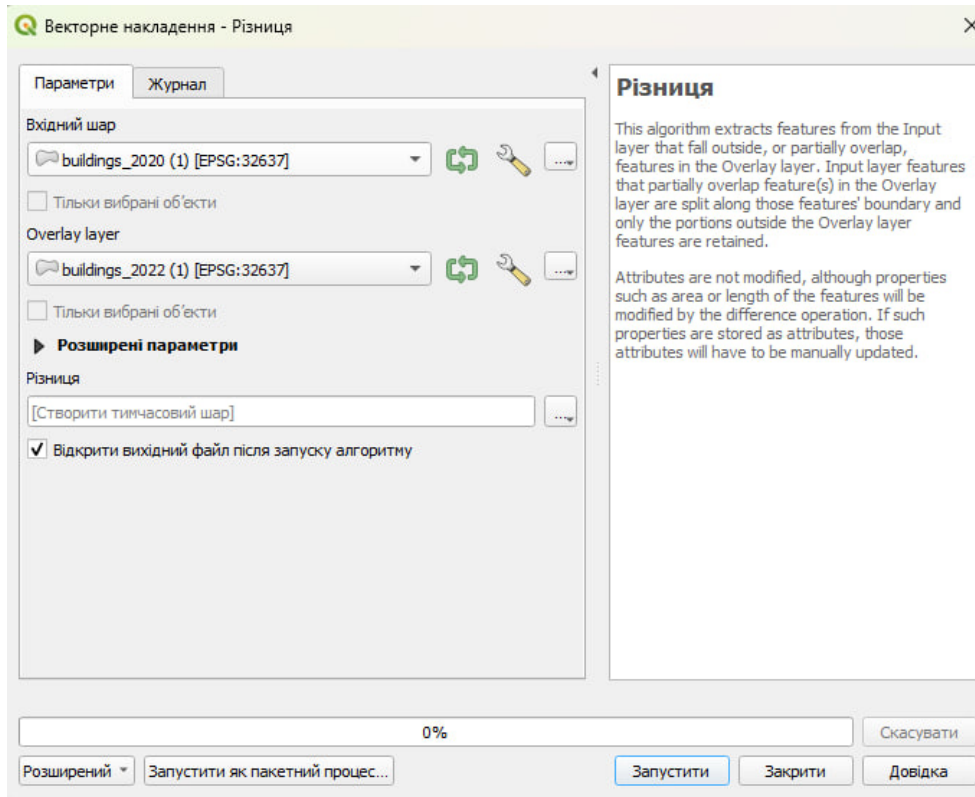


Рис. 3.21 Використання функції векторного накладання

Для цього необхідно задати шари, як вказано на рисунку 3.21, і розпочати процес аналізу, натиснувши на кнопку 'Запустити'. Після цього ми отримаємо результат аналізу у вигляді окремого шару, на якому буде зображено об'єкти, яких немає на шарі будівель 2022 року відносно шару будівель 2020 року.

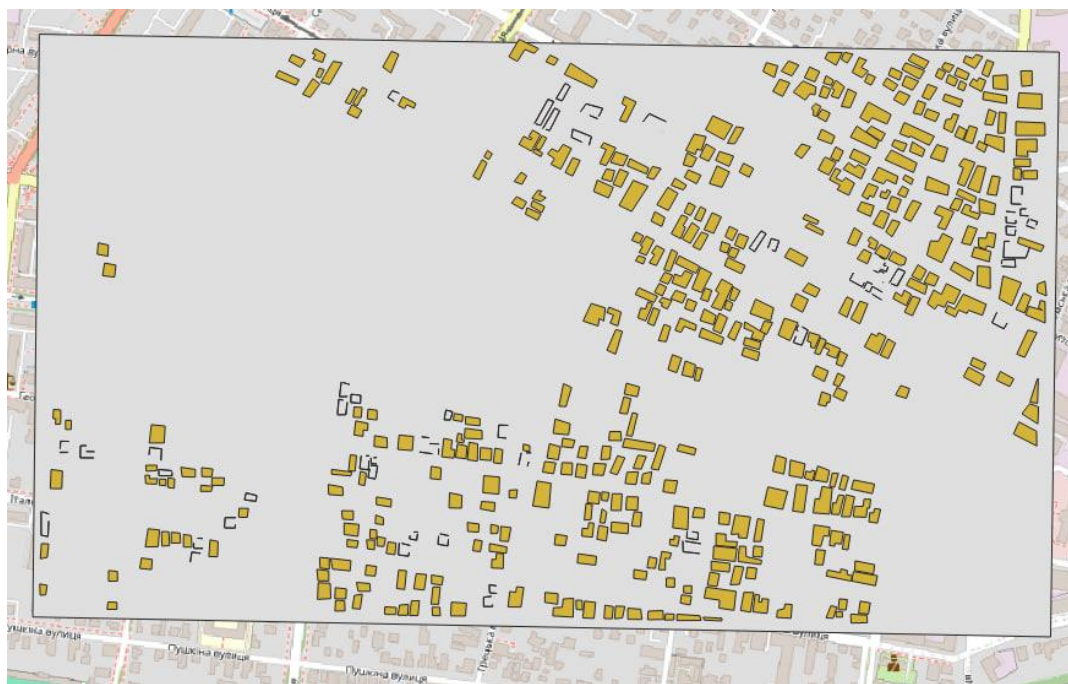


Рис. 3.22. Житлові будівлі після використання функції векторного накладання

Ми обрали варіант з векторизацією вцілілих і пошкоджених землекористувань вручну через специфіку роботи зі супутниковими знімками територій, які були зроблені під час бойових дій. Вважаємо, що проведення подібного аналізу дозволить провести більш точну векторизацію. Ми це будемо робити за допомогою функції ‘Створити шар GeoPackage’ створюючи кожен необхідний нам шар для побудови карти.

Нам необхідно векторизувати пошкоджені та вцілілі будинки на супутникових знімках за 2020, 2022 та 2024 роки (див. рис. 3.23). Для цього на знімках ми будемо використовувати спеціальні умовні позначення для будівель, які зазнали пошкоджень внаслідок бойових дій. [29]



Рис. 3.23. Векторні шари багатоповерхівок і одно- двоповерхових будівель за різні роки

Отриманий результат відображений на рисунку 3.23. Незабаром, після того як ми довекторизуємо інфраструктурні будівлі і багаторічні насадження, зможемо отримати аналіз пошкоджених ділянок в гектарах, а також побачимо відсоткове

співвідношення змін, які відбулися внаслідок бойових дій на цих територіях. Але вже на етапі візуальної ідентифікації пошкоджень можна відзначити, що в 2022 році більшість будівель в нашій робочій області отримали значні пошкодження або ж були повністю знищені (див. рис. 3.24).



Рис. 3.24. Знищений район дослідження

Далі було векторизовано землі під інфраструктурними будівлями (також було віднесено два торгових центра і деякі релігійні споруди) та багаторічними насадженнями. Для векторизації пошкоджених будівель також було використано спеціальні позначення (див. рис. 3.25).



Рис. 3.25. Векторизований район дослідження.

Цікавим фактом є те, що в 2022 році внаслідок бойових дій, всі території, які в 2020 році були під багаторічними насадженнями, вигоріли внаслідок пожеж і прильотів снарядів. На супутникових знімках 2022 року не вдалось ідентифікувати жодної вцілілої ділянки багаторічних насаджень. Вже на знімках 2024 року ми можемо побачити різкі зміни і озеленення. Воно відбувається через природні

процеси, а також можна помітити, що на ділянках, де були знищені житлові будівлі та будівлі інфраструктури, з часом відбувається ріст багаторічних насаджень. Деякі інфраструктурні будівлі не отримали пошкоджень в 2022 році, а деякі були відновлені в 2024 році (див. рис. 3.26), але детальну картину ми побачимо після того, як отримаємо аналіз пошкоджень в гектарах за допомогою використання функцій QGIS. [18]



Рис. 3.26. Знищені одно- і двоповерхові будівлі а також багаторічні насадження

Для того, щоб розпочати аналіз кожної ділянки, для початку варто перевірити, чи кожен з шарів знаходиться в однаковій з основною мапою системою координат, щоб відбувався правильний розрахунок в подальших діях. Для цього достатньо

натиснути правою клавішою миші на шар і навести на вкладку ‘СК Шару’ і поставити необхідну систему координат. Такі дії потрібно провести з кожним шаром, де ми будемо проводити розрахунки. [27]

Після цього нам треба перейти в Таблицю Атрибутів кожного шару і додати в таблицю поле, яке буде відповідати за площу кожного об’єкта. Після того, як ми додали поле, можна в рядку з формулами вписати значення \$area, яке буде відповідати за розрахунок площі кожного об’єкта в квадратних метрах. Для того, щоб розпочати розрахунок в гектарах нам необхідно написати формулу таким чином: \$area/10000 і натиснути на кнопку ‘Оновити Все’ в таблиці Атрибутів (див. рис. 3.27).

	fid	littlebuilding_2020	area_ha
1	312	NULL	0,090564564288...
2	233	NULL	0,089966510616...
3	232	NULL	0,087521811833...

Рис. 3.27. Результат використання функції \$area

Після цього ми отримаємо дані площі кожного окремого об’єкта в гектарах і подібну дію нам треба провести з кожним шаром, де ми будемо проводити наші подальші розрахунки (див. рис. 3.28).

littlebuilding_2020 — Features Total: 456, Filtered: 456, Selected: 0				forest_2020 — Features Total: 276, Filtered: 276, Selected: 0				infrastructure_2020 — Features Total: 38, Filtered: 38, Selected: 0				buildings_2020 — Features Total: 223, Filtered: 223, Selected: 0			
fid	littlebuilding_2020	area_ha		fid	forest_2020	area_ha		fid	infrastructure_2020	infastr_ha		fid	buildings_2020	area_m2	area_ha
1	312	NULL	0,090564564288...	1	2	NULL	1,543628803074...	1	37	NULL	0,488183189897...	1	10	NULL	4728 0,472830303635...
2	233	NULL	0,089966510616...	2	3	NULL	1,506298896795...	2	31	NULL	0,449781699691...	2	41	NULL	4561 0,456136689719...
3	232	NULL	0,087521811833...	3	1	NULL	0,702602089933...	3	4	NULL	0,388879742152...	3	38	NULL	4127 0,412673309509...
4	47	NULL	0,086118915447...	4	161	NULL	0,149742234823...	4	38	NULL	0,286848236454...	4	206	NULL	3667 0,366652000910...
5	214	NULL	0,081840737321...	5	24	NULL	0,145554313822...	5	17	NULL	0,217267912631...	5	213	NULL	3617 0,361721029606...
6	251	NULL	0,079454677883...	6	4	NULL	0,143809258435...	6	24	NULL	0,204821792763...	6	40	NULL	3457 0,345665790158...
7	242	NULL	0,076328966244...	7	36	NULL	0,140976824341...	7	35	NULL	0,194121370844...	7	210	NULL	3281 0,328147562148...
8	420	NULL	0,073394356997...	8	102	NULL	0,116507478558...	8	33	NULL	0,188443860693...	8	55	NULL	3037 0,303708663895...
				9	39	NULL	0,114865365059...	9	32	NULL	0,1168955732268...	9	38	NULL	2661 0,266067962378...

Рис. 3.28. Результати використання \$area для різних шарів

Далі ми можемо використати інструмент ‘Basic statistics for fields’ для того, щоб отримати сукупні дані площ в гектарах певного шару. Для цього нам необхідно перейти Вектор => Analysis Tool => Basic statistics for fields... і в вікні, яке відкриється, обрати шар, на якому буде проводитись розрахунок, а також поле з таблиці атрибутів, яке відповідає за площу в гектарах, для того щоб QGIS все правильно розрахував. Після цього ми отримаєм файл-документ, в якому міститься вся нам необхідна інформація, а саме сума площ кожного об’єкта певного шару (див. рис. 3.29).

```
Analyzed field: area_ha
Count: 198
Unique values: 198
NULL (missing) values: 25
NOT NULL (filled) values: 198
Мінімальне значення: 0.0131922
Максимальне значення: 0.47283
Range: 0.459638
Sum: 18.063294
Mean value: 0.091229
Median value: 0.063214
Standard deviation: 0.080010390258
Coefficient of Variation: 0.877030
Minority (rarest occurring value): 0.0131922
Majority (most frequently occurring value): 0.0131922
First quartile: 0.041150
Third quartile: 0.110563
Interquartile Range (IQR): 0.0694129
```

Рис. 3.29. Використання ‘Basic statistics for fields’

Далі ми використовуємо цю функцію для кожного шару, який нам потрібно порівняти, а саме для шарів багатоповерхівок, звичайних будівель, багаторічних насаджень і будівель інфраструктури.

Багатоповерхівки 2020 – 2022 – 2024:

В **2020** році було 18,06 гектар цілих багатоповерхівок, які розміщені біля Театрального скверу і Митрополитської, Миколаївської, Грецької і Георгіївської вулиць

В **2022** році залишилось 1,984 гектара вцілілих будівель, отже під час активної фази бойових дій, яка проходила в місті і внаслідок авіабомбардувань які припали на цей район було знищено або пошкоджено близько 16.07 гектар багатоповерхівок, що становить 88,9% від загальної кількості.

В **2024** році стало 7,47 гектара вцілілих або відремонтованих будівель, отже кількість будівель, які залишаються знищеними, або ж пошкодженими становить 10,6 гектарів, або ж близько 60% відсотків від загальної кількості будівель, які були цілими в 2020 році. Варто відзначити, що переважно було відновлено тільки ті будівлі, де було видно тільки покрівельні пошкодження або ж мали 1-2 вирви від артилерійських прильотів. Будинки, які зазнали суттєвих пошкоджень, було знесено і на їхньому місці на даний момент нічого немає. [25]

Малі будинки 2020 – 2022 – 2024:

В **2020** році загальна площа малих будівель становила 12,96 гектар, а їхня кількість дорівнювала 453 будівлям, які вдалось візуально ідентифікувати на супутникових знімках.

В **2022** році залишилось 1,44 гектара вцілілих будівель і 53 цілі малі будинки, які вдалось ідентифікувати. Внаслідок бойових дій пошкодження отримало 11,52 гектара або ж 400 малих будівель, що становить 88% від загальної кількості будинків, які були в 2020 році.

В **2024** році вдалось ідентифікувати 2.53 гектара вцілілих і відновлених малих

будівель, що становить 103 одиниці. Пошкодженими і знищеними залишилось 10,43 гектара або ж 350 малих будівель, що становить 77% від загальної кількості.

Суттєва різниця у відновленні між багатоповерхівками і малими будівлями полягає в декількох факторах. Першим і головним є той, що значна частина цих будівель є одно- або двоповерховими об'єктами і вагома частина з них на супутникових знімках 2022 року була знищена майже до фундаменту і на її місці в 2024 році вже почала проростати рослинність. Також частина багатоповерхівок знаходиться на вулицях біля Театру, де активно ведеться робота російських пропагандистів і їх відновлювали саме для того, щоб створити картинку 'розбудови' Маріуполя. В свою чергу, малі будівлі знаходяться в районах за багатоповерхівками або там, де російська пропаганда не акцентує свою увагу, тому і не потребує ніякого відновлення з боку російської окупаційної влади. [22]

Багаторічні насадження 2020 – 2022 – 2024

В **2020** році було 13,28 гектарів багаторічних насаджень, які розміщувались як біля інфраструктурних будівель, так і на прибудинкових територіях. Також в це число входить і сад біля Драматичного Театру.

В **2022** році не залишилось жодного вцілілого об'єкту, оскільки основна частина багаторічних насаджень знаходилась біля будівель, які отримали значні пошкодження внаслідок бойових дій, через що вигоріли.

В **2024** році стало 18,71 гектар багаторічних насаджень або рослинності, що становить 40% приросту відносно показників 2020 року. Причиною цього росту є саме знищення будівель і їх подальше знесення, що і спричинило ріст нової рослинності на їхньому місці.

Будівлі інфраструктури 2020 – 2022 – 2024

В **2020** році площа під будівлями інфраструктури займала 3,37 гектара, а їхня кількість становила 26 будівель, які нам вдалось візуально ідентифікувати на

супутникових знімках.

В 2022 році не залишилось жодного вцілілого будинку, отже 3,37 гектар або ж 26 будівель або отримали пошкодження, або ж були повністю знищені. В цей перелік входять школи, дитсадки, торгові центри і т.д.

В 2024 році стало 1,79 гектара відбудованих будівель, або ж 12 відбудованих будинків. 1,58 гектара або ж 14 будівель залишились в зруйнованому стані, а деякі були знесені повністю, що становить 46% від загальної площі будинків, які були цілими в 2020 році.

Отже, проведене нами дослідження з використанням методології дистанційного моніторингу (із застосуванням Google Earth Engine та QGIS) може бути впроваджене у стандартні операційні процедури органів земельних ресурсів на час військового стану та у повоєнний період, що дозволить забезпечити безперервність обліку та контролю землекористування, незважаючи на фізичний доступ.

Використання ДЗЗ та ГІС-технологій для територій, що зазнали пошкоджень від воєнних дій, може слугувати основою для створення єдиної цифрової бази збитків, де пошкодження, векторизовані за даними ДЗЗ, будуть автоматично зіставлятися з Кадастровою картою. Це дозволить оперативно отримувати точну інформацію про власників, площу та категорію пошкоджених земель, формуючи доказову базу для міжнародних судів та компенсаційних механізмів. [28]

Використання карт динаміки змін (виявлені аномалії, пошкодження інфраструктури, воронки), створених за допомогою ГІС-аналізу, для планування та оптимізації операцій гуманітарного розмінування, дозволить спрямувати ресурси в найбільш постраждалі та критичні райони.

Висновки до розділу 3

Розроблена інтегрована методологія дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС) була успішно апробована на прикладі досліджуваної території (центральної частини м. Маріуполь та прилеглих до центру вулиць), підтвердивши свою ефективність для роботи в умовах військового конфлікту.

За допомогою мультичасового аналізу даних ДЗЗ встановлено та кількісно оцінено масштаби трансформації землекористування, зокрема, площі зруйнованих сільськогосподарських угідь та пошкодженої забудови.

Створено детальні векторні карти просторового розподілу основних типів військових пошкоджень (воронки, зони пірогенного впливу, лінії оборонних споруд), які забезпечують точну просторову локалізацію зон критичної деградації.

Отримані картографічні та аналітичні матеріали є об'єктивною інформаційною основою для визначення пріоритетів у відновлювальних роботах, плануванні гуманітарного розмінування та формування доказової бази для оцінки завданих збитків.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі на тему «Моніторинг землекористування прифронтових територій Донецької області засобами ДЗЗ та ГІС (на прикладі районів м.Маріуполь Донецької області)» ми розглянули використання даних супутникових знімків і геосистем для аналізу пошкоджень територій.

На початковому етапі було розглянуто теоретико-методологічні основи функціонування систем обліку та використання земель у воєнний період, визначено ключові проблеми управління земельними ресурсами в умовах бойових дій та окреслено особливості трансформації землекористування під впливом військової агресії.

Подальший етап був присвячений вивченню можливостей дистанційного зондування Землі для оцінювання наслідків воєнних дій. Було здійснено порівняльний огляд геопорталів та супутникових джерел даних (Google Earth Engine, Google Earth Pro, ArcGis, QGIS). Обґрунтовано вибір платформ, що найкраще відповідають задачам моніторингу пошкоджених територій, та визначено перелік оптимальних індексів для аналізу земного покриття в прифронтових зонах.

У роботі застосовано інструменти ГІС-аналізу для дослідження змін землекористування, зокрема виконано обробку, калібрування та інтеграцію супутникових зображень у середовищах Google Earth Engine, QGIS. Створено сезонні композити Sentinel-2 за 2020, 2022 та 2025 роки, що забезпечило коректне міжрічне порівняння. Розраховано спектральні індекси NDVI та NDBI, які дозволили окремо оцінити стан рослинності, пошкоджень та рівень урбанізації. Проведено детальний аналіз за індексами NDVI та NDBI, що дало можливість кількісно визначити площі деградації, стабільності та потенційного відновлення територій. Зокрема, встановлено, що між 2020 та 2025 роками частка пікселів із ознаками деградації рослинності суттєво зросла, тоді як площа стабільної або високопродуктивної рослинності зменшилася. За NDBI виявлено збільшення

територій із підвищеною часткою оголених поверхонь та руйнувань, що корелює зі зростанням інфраструктурних пошкоджень у період активних бойових дій.

Окрему увагу приділено векторизації об'єктів землекористування на основі високороздільних знімків (2020, 2022, 2024 рр.). Виконано покрокове створення векторних шарів для будівель, інфраструктури та природних компонентів. Реалізовано прив'язку, атрибутивну структуру, розрахунок площ та кількісне порівняння між роками. Векторний аналіз дозволив деталізувати осередки руйнувань, зникнення забудови, і виокремити просторові патерни трансформації. У підсумку дослідження було отримано повну картографічну модель багаторічних змін землекористування на прикладі прифронтової певного району м. Маріуполь.

Отримані результати демонструють ефективність комплексного використання ДЗЗ та ГІС для оцінювання стану та динаміки прифронтових територій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Understanding War Through Data: The Ultimate Conflict Analysis Collection
Режим доступу: <https://datahub.io/blog/understanding-war-through-data-the-ultimate-conflict-analysis-collection>
2. Geospatial analysis of the fire incidents and burned areas induced by Russia-Ukraine war in 2022 using MODIS and VIIRS data. Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12518-025-00634-6>
3. Decentralized, nation-wide, high-frequency war damage mapping using InSAR time series data. Режим доступу: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022AGUFMNH32D0489S/abstract>
4. The Use of Artificial Intelligence and Satellite Remote Sensing in Land Cover Change Detection: Review and Perspectives. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/1/274>
5. Google Earth. Режим доступу: https://earth.google.com/web/@47.1029055,37.52347191,73.84815664a,6770.96444053d,34.99999834y,18.92099919h,0t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBCAaggASgOI_ARAA?authuser=0
6. GIS and Multi-Criteria Decision Analysis for Land Use Resource Planning. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/256667221_GIS_and_Multi-Criteria_Decision_Analysis_for_Land_Use_Resource_Planning
7. GIS: technologies for spatial analysis and visualization. Режим доступу: <https://www.e-zigurat.com/en/blog/gis-technologies-spatial-analysis-visualization/>
8. Spatiotemporal Analysis and War Impact Assessment of Agricultural Land in Ukraine Using RS and GIS Technology. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/364450220_Spatiotemporal_Analysis_and_War_Impact_Assessment_of_Agricultural_Land_in_Ukraine_Using_RS_and_GIS_Technology

9. Мікава П.В., Дрозд С.Ю. Метод виявлення пошкоджень земної поверхні внаслідок воєнних дій за допомогою супутникових даних. Режим доступу: <https://jais.net.ua/index.php/files/article/view/208>

10. Monitoring Urban Change in Conflict from the Perspective of Optical and SAR Satellites: The Case of Mariupol, a City in the Conflict between RUS and UKR. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/12/3096>

11. Openstreetmap. Режим доступу: <https://www.openstreetmap.org/#map=15/47.10155/37.52985&layers=T>

12. Monitoring Urban Change in Conflict from the Perspective of Optical and SAR Satellites: The Case of Mariupol. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/12/3096>

13. Damage assessment of buildings in Mariupol using satellite imagery and machine learning. Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10043821>

14. UNOSAT Preliminary Satellite-derived Damage Assessment - Mariupol City, Ukraine (Reports). Режим доступу: <https://unitar.org/maps/map/3538>

15. Environmental impact of the war in Ukraine: Preliminary review of the environmental situation. (UNEP Report). Режим доступу: <https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-war-ukraine-preliminary-review>

16. War in Ukraine: EO-based damage assessment for the agricultural sector. (ESA - European Space Agency). Режим доступу: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Satellites_document_damage_to_Ukraine_s_agriculture

17. Geospatial analysis of the fire incidents and burned areas induced by Russia-Ukraine war in 2022 using MODIS and VIIRS data. Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12518-025-00634-6>

18. Mapping the damage to Ukraine's forests caused by the war. (CEOBS). Режим доступу: <https://ceobs.org/ukraine-conflict-environmental-briefing-forests/>

19. The Use of Artificial Intelligence and Satellite Remote Sensing in Land Cover Change Detection: Review and Perspectives. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/1/274>

20. Decentralized, nation-wide, high-frequency war damage mapping using InSAR time series data. Режим доступу: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022AGUFMNH32D0489S/abstract>

21. Assessment of the environmental damage caused by the war in Ukraine using remote sensing data. (Journal of Environmental Management). Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-environmental-management>

22. Rapid Damage Assessment in Mariupol Based on Post-War Satellite Imagery. (ISPRS Annals). Режим доступу: <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/>

23. NASA Harvest: Monitoring Agriculture in Ukraine During the War. Режим доступу: <https://nasaharvest.org/news/nasa-harvest-reports-impact-war-ukraine-agriculture>

24. Mapping and quantifying the impact of the war on agriculture in Ukraine. (Nature Food). Режим доступу: <https://www.nature.com/articles/s43016-023-00878-5>

25. Copernicus Emergency Management Service (CEMS) – On-demand Mapping for Ukraine. Режим доступу: <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-activations-risk-and-recovery>

26. Using Nighttime Light Data (VIIRS) to Monitor Conflict Intensity in Ukraine. Режим доступу: <https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>

27. Аналіз впливу військових дій на стан земельних ресурсів Донецької області засобами ГІС. (Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія). Режим доступу: <http://geolvisnyk.univ.kiev.ua/>

28. REACH Initiative: Ukraine Humanitarian Situation Monitoring – Damage Assessment. Режим доступу: <https://www.reach-initiative.org/where-we-work/ukraine/>

29. EOS Data Analytics: How Satellite Imagery Helps in Assessing War Damages

in Ukraine. Режим доступу: <https://eos.com/blog/satellite-imagery-war-damages-ukraine/>

30. Understanding War Through Data: The Ultimate Conflict Analysis Collection. Режим доступу: <https://datahub.io/blog/understanding-war-through-data-the-ultimate-conflict-analysis-collection>

31. Google Earth Engine for Geo-Big Data Applications: A Review. (Методологічне джерело). Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8004481>

32. GIS and Multi-Criteria Decision Analysis for Land Use Resource Planning. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/256667221>

33. Application of NDVI and NDWI indices for monitoring of surface water bodies and vegetation in conflict zones. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/journal/remotesensing>

34. U.S. Department of State: Conflict Observatory – Ukraine. (Звіти про руйнування Маріуполя та інших міст). Режим доступу: <https://conflictobservatory.org/>

35. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України. (KSE Institute). Режим доступу: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zvit-pro-pryami-zbitki-infrastrukturi/>

36. QGIS Documentation. Посібник користувача для аналізу геопросторових даних. Режим доступу: https://docs.qgis.org/3.28/en/docs/user_manual/

37. Методика визначення шкоди та збитків, завданих земельному фонду України внаслідок збройної агресії. (Законодавство України, Верховна Рада). Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0436-22#Text>

Додатки

```
1 var aoi = ee.Geometry.Polygon([[
2   [37.474580, 47.095551], // SW
3   [37.473164, 47.118655], // NW
4   [37.526679, 47.118509], // NE
5   [37.526336, 47.098005] // SE
6 ]], null, false);
7
8 Map.setOptions('SATELLITE');
9 Map.centerObject(aoi, 14);
10 Map.addLayer(aoi, {color:'red'}, 'AOI');
11
12
13 function maskS2(img){
14   var scl = img.select('SCL');
15   var good = scl.eq(4).or(scl.eq(5)).or(scl.eq(6)).or(scl.eq(7)).or(scl.eq(11)); // veg/soil/water
16   return img.updateMask(good).copyProperties(img, img.propertyNames());
17 }
18
19
20 function getNDVI(year){
21   var start = ee.Date.fromYMD(year, 5, 25);
```

Додаток А

```
magisterskarobota * Get Link Save Run Reset Apps
1 var THRESH = 0.10;
2 var visNDVI = {min:-0.2, max:0.9, palette:['brown','yellow','green']};
3 var visCHG = {min:-1, max:1, palette:['#b2182b','#ffffbf','#1a9850']};
4
5 var aoi = ee.Geometry.Polygon([[
6   [37.474580, 47.095551], // SW
7   [37.473164, 47.118655], // NW
8   [37.526679, 47.118509], // NE
9   [37.526336, 47.098005] // SE
10 ]], null, false);
11
12 function maskS2(img){
13   var scl = img.select('SCL');
14   var good = scl.eq(4).or(scl.eq(5)).or(scl.eq(6)).or(scl.eq(7)).or(scl.eq(11));
15   return img.updateMask(good).copyProperties(img, img.propertyNames());
16 }
17
18 function seasonComposite(year){
19   var start = ee.Date.fromYMD(year, 5, 25);
20   var end = ee.Date.fromYMD(year, 7, 10);
21   return ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
```

Додаток Б

```
magisterskarobota * Get Link Save Run Reset Apps
21 return ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
22   .filterBounds(aoi)
23   .filterDate(start, end)
24   .filter(ee.Filter.lte('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 60))
25   .map(maskS2)
26   .median()
27   .clip(aoi);
28 }
29
30 function addIndices(img){
31   var ndvi = img.normalizedDifference(['B8','B4']).rename('NDVI'); // (NIR-RED)/(NIR+RED)
32   var ndwi = img.normalizedDifference(['B3','B8']).rename('NDWI'); // McFeeters: (GREEN-NIR)/(GREEN+NIR)
33   var nbr = img.normalizedDifference(['B8','B12']).rename('NBR'); // (NIR-SWIR2)/(NIR+SWIR2)
34   var bsi = img.expression('(SWIR + RED - NIR - BLUE) / (SWIR + RED + NIR + BLUE)',{
35     SWIR: img.select('B11'), RED: img.select('B4'), NIR: img.select('B8'), BLUE: img.select('B2')
36   }).rename('BSI'); // Bare Soil Index
37   return img.addBands([ndvi, ndwi, nbr, bsi]);
38 }
39
40
41 var years = [2020, 2022, 2025];
```

Додаток В

```

magisterskarobota *
49
50 Map.addLayer(withIdx.select('NDVI'), visNDVI, 'NDVI ' + y, false);
51 return withIdx;
52 });
53
54
55 var IMG2020 = ee.Image(stacks[0]);
56 var IMG2022 = ee.Image(stacks[1]);
57 var IMG2025 = ee.Image(stacks[2]);
58 var NDVI2020 = IMG2020.select('NDVI');
59 var NDVI2022 = IMG2022.select('NDVI');
60 var NDVI2025 = IMG2025.select('NDVI');
61
62
63 function changeMap(ndviBefore, ndviAfter, thresh){
64   var diff = ndviAfter.subtract(ndviBefore).rename('dNDVI');
65   var cls = ee.Image(0).where(diff.lte(-thresh), -1).where(diff.gte(thresh), 1).rename('chgClass');
66   var opened = cls.focal_mode({radius: 1});
67   var significant = opened.updateMask(opened.neq(0));
68   return {diff: diff, classes: opened, significant: significant};
69 }

```

Додаток Г

```

magisterskarobota *
1 var THRESH = 0.10;
2 var visNDVI = {min:-0.2, max:0.9, palette:['brown','yellow','green']};
3 var visCHG = {min:-1, max:1, palette:['#b2182b','#ffffbf','#1a9850']};
4 var visNDBI = {min:-0.4, max: 0.4, palette: ['#2c7bb6','#abd9e9','#ffffbf','#fdae61','#d7191c']};
5 var THRESH_NDBI = 0.10;
6
7
8 var aoi = ee.Geometry.Polygon([
9   [37.474580, 47.095551], // SW
10  [37.473164, 47.118655], // NW
11  [37.526679, 47.118509], // NE
12  [37.526336, 47.098005] // SE
13 ]);
14
15 Map.setOptions('SATELLITE');
16 Map.centerObject(aoi, 14);
17 Map.addLayer(aoi, {color:'red'}, 'AOI');
18
19
20 function maskS2(img){
21   var scl = img.select('SCL');
22   var good = scl.eq(4).or(scl.eq(5)).or(scl.eq(6)).or(scl.eq(7)).or(scl.eq(11));
23   return img.updateMask(good).copyProperties(img, img.propertyNames());
24 }
25
26 function seasonComposite(year){
27   var start = ee.Date.fromYMD(year, 5, 25);
28   var end = ee.Date.fromYMD(year, 7, 10);
29   return ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
30     .filterBounds(aoi)
31     .filterDate(start, end)
32     .filter(ee.Filter.lte('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 60))
33     .map(maskS2)
34     .median()
35     .clip(aoi);
36 }
37
38 // yci iндeкcи
39 function addIndices(img){
40   var ndvi = img.normalizedDifference(['B8','B4']).rename('NDVI');
41   var ndwi = img.normalizedDifference(['B3','B8']).rename('NDWI');
42   var nbr = img.normalizedDifference(['B8','B12']).rename('NBR');
43   var bsi = img.expression('(SWIR + RED - NIR - BLUE) / (SWIR + RED + NIR + BLUE)',{
44     SWIR: img.select('B11'), RED: img.select('B4'), NIR: img.select('B8'), BLUE: img.select('B2')
45   }).rename('BSI');
46   var ndbi = img.normalizedDifference(['B11','B8']).rename('NDBI');
47   return img.addBands([ndvi, ndwi, nbr, bsi, ndbi]);
48 }
49
50
51 var years = [2020, 2022, 2025];
52 var stacks = years.map(function(y){
53   var comp = seasonComposite(y);
54   var withIdx = addIndices(comp).set('year', y);
55
56   Map.addLayer(withIdx.select('NDWI'), {min:-0.6,max:0.6,palette:['#8c510a','#f6e8c3','#c7eae5','#5ab4ac','#01665e']}, 'NDWI ' + y, false);
57   Map.addLayer(withIdx.select('NBR'), {min:-0.5,max:0.5,palette:['black','red','orange','yellow','white']}, 'NBR ' + y, false);
58   Map.addLayer(withIdx.select('BSI'), {min:-0.5,max:0.5,palette:['#1a9850','#d9ef8b','#fee08b','#f46d43','#a50026']}, 'BSI ' + y, false);
59   Map.addLayer(withIdx.select('NDVI'), visNDVI, 'NDVI ' + y, false);
60   Map.addLayer(withIdx.select('NDBI'), visNDBI, 'NDBI ' + y, false);
61   return withIdx;
62 });
63
64 var IMG2020 = ee.Image(stacks[0]);
65 var IMG2022 = ee.Image(stacks[1]);
66 var IMG2025 = ee.Image(stacks[2]);
67
68 /***** CHANGE-MAP NDVI *****/
69 function changeMap(idxBefore, idxAfter, thresh){
70   var diff = idxAfter.subtract(idxBefore).rename('dIdx');
71   var cls = ee.Image(0)
72     .where(diff.lte(-thresh), -1)
73     .where(diff.gte(thresh), 1)

```

Додаток Д

```

magisterskarobota *
107 indexHistChart(ee.Image(stacks[years.indexOf(y)]), band, y);
108 });
109 });
110
111
112 function statsFor(image, band, year){
113   var reducers = ee.Reducer.mean()
114     .combine({reducer2:ee.Reducer.median(),sharedInputs:true})
115     .combine({reducer2:ee.Reducer.stdDev(),sharedInputs:true})
116     .combine({reducer2:ee.Reducer.minMax(),sharedInputs:true});
117   var st = image.select(band).reduceRegion({
118     reducer:reducers, geometry:aoi, scale:10, maxPixels:1e13, bestEffort:true
119   });
120   return ee.Feature(null,{
121     year:year, band:band,
122     mean:st.get(band+'_mean'),
123     median:st.get(band+'_median'),
124     stdDev:st.get(band+'_stdDev'),
125     min:st.get(band+'_min'),
126     max:st.get(band+'_max')
127   });
128 }
129
130 var bands = ['NBR','BSI','NDBI'];
131 var statTable = ee.FeatureCollection(
132   bands.map(function(b){
133     return [2020,2022,2025].map(function(y){
134       return statsFor(ee.Image(stacks[years.indexOf(y)]), b, y);
135     });
136   }).flat()
137 );
138 print('Statistics (AOI):', statTable);
139
140 Export.table.toDrive({
141   collection: statTable,
142   description: 'Indices_stats_2020_2022_2025',
143   fileNamePrefix: 'Indices_stats_2020_2022_2025',
144   fileFormat: 'CSV'
145 });
146
147 var NDBI2020 = IMG2020.select('NDBI');
148 var NDBI2022 = IMG2022.select('NDBI');
149 var NDBI2025 = IMG2025.select('NDBI');
150
151 var chgN_22_20 = changeMap(NDBI2020, NDBI2022, THRESH_NDBI);
152 var chgN_25_20 = changeMap(NDBI2020, NDBI2025, THRESH_NDBI);
153 var visCHG_NDBI = {min:-1,max:1,palette:['#b2182b','#ffffbf','#1a9850']};
154 Map.addLayer(chgN_22_20.significant, visCHG_NDBI, 'NDBI change 2022-2020 (±'+THRESH_NDBI+')', false);
155 Map.addLayer(chgN_25_20.significant, visCHG_NDBI, 'NDBI change 2025-2020 (±'+THRESH_NDBI+')', false);
156
157
158 function areaByClass(classImg, name, thresh){
159   var pxArea = ee.Image.pixelArea();
160   function areaHa(mask){
161     var a = mask.selfMask().multiply(pxArea).reduceRegion({
162       reducer: ee.Reducer.sum(), geometry:aoi, scale:10, maxPixels:1e13, bestEffort:true
163     }).values().get(0);
164     return ee.Number(a).divide(10000);
165   }
166   var worsened = areaHa(classImg.eq(-1));
167   var stable = areaHa(classImg.eq(0));
168   var improved = areaHa(classImg.eq(1));
169   var feat = ee.Feature(null,{
170     map:name, threshold:thresh,
171     worsened_ha:worsened, stable_ha:stable, improved_ha:improved
172   });
173   print('Area stats '+name, feat);
174   return feat;
175 }
176
177
178 var areaTable = ee.FeatureCollection([
179   areaByClass(chg_22_20.classes, 'NDVI 2022-2020', THRESH),
180   areaByClass(chg_25_20.classes, 'NDVI 2025-2020', THRESH)
181 ]);

```

Додаток Е

```

magisterskarobota *
22 var end = start.advance(1, 'month'); // до 1 липня не включно
23 var s2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
24   .filterBounds(aoi)
25   .filterDate(start, end)
26   .filter(ee.Filter.lte('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 60))
27   .map(maskS2_L2A);
28
29 return s2.median().clip(aoi).set('year', year).set('count', s2.size());
30 }
31
32
33 var years = [2020, 2022, 2025];
34 var comps = ee.ImageCollection(years.map(juneComposite));
35
36
37 var visRGB = {bands: ['B4','B3','B2'], min: 0, max: 3000};
38 years.forEach(function(y){
39   var img = ee.Image(comps.filter(ee.Filter.eq('year', y)).first());
40   Map.addLayer(img, visRGB, 'S2 RGB - Jun ' + y, false); // 'false' - шар викинено за замовч., увімкнеш вручну
41   print('Jun ' + y + ' scenes count:', img.get('count'));
42 });

```

Додаток Є