

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

Факультет геології, географії, рекреації і туризму

Кафедра фізичної географії та картографії

До захисту допустити
Зав. кафедри _____ доцент **Анатолій БАЙНАЗАРОВ**
« _____ » _____ 2025 р.

**ГІС-АНАЛІЗ ПОРУШЕНЬ ЛАНДШАФТІВ БАЛАКЛІЙСЬКОЇ ГРОМАДИ
ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ НА ОСНОВІ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО
ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Виконала: студентка 2-го курсу д.ф.з.о.
групи ГД- 21

спеціальність: 106 Географія

освітня програма: Картографія, геоінформаційні
системи і дистанційне зондування Землі

Ірина Володимирівна СИМОНЕНКО

Науковий керівник:

доцент, к.геогр.н. Олена АГАПОВА

Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою

Голова ЕК **Валентина РЕДІНА**

Секретар ЕК **Тетяна БУЛГАКОВА**
« _____ » _____ 2025 р.

Харків – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ I. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРУШЕНЬ ЛАНДШАФТІВ НА ОСНОВІ ДАНИХ ДЗЗ ТА ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ.....	9
1.1. Ландшафт як об'єкт геоінформаційного аналізу.....	9
1.2. Наслідки впливу воєнних дій на ландшафти.....	15
1.3. Застосування геоінформаційних систем (ГІС) і дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у наукових дослідженнях стану та змін ландшафтів.....	21
РОЗДІЛ II. ТЕРИТОРІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ. ДЖЕРЕЛА ДАНИХ ТА МЕТОДИКА ЇХ АНАЛІЗУ.....	33
2.1. Географічна характеристика та ландшафтні особливості Балаклійської громади.....	33
2.2. Загальний огляд ГІС-програм, ДЗЗ-платформ та матеріалів дослідження.....	42
2.3. Визначення й обґрунтування оптимальних порогових значень індексів (NDVI, BSI) для виявлення змін ландшафтів.....	52
2.4. Методика обробки даних для оцінки впливу воєнних дій на досліджувану територію в середовищі Google Earth Engine.....	59
РОЗДІЛ III. ГІС-АНАЛІЗ ПОРУШЕНЬ ЛАНДШАФТІВ БАЛАКЛІЙСЬКОЇ ГРОМАДИ НА ОСНОВІ ДАНИХ ДЗЗ (НА ПРИКЛАДІ АГРОЛАНДШАФТІВ).....	75
3.1. Аналіз території дослідження за обраною методикою.....	75
3.2. Візуалізація та просторовий аналіз порушень на основі результатів дослідження.....	79
3.3. Оцінка порушень внаслідок впливу воєнних дій на агроландшафти Балаклійської громади.....	91

ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	98

ВСТУП

Актуальність. Воєнні дії здійснюють комплексний вплив на ландшафти, змінюючи їхню природничу та суспільно-географічну структуру. Мінування, вибухи, пожежі, переміщення бронетехніки, масштабні руйнування інфраструктури та хімічне забруднення призводять до негативних довготривалих наслідків у природному середовищі змінюючи його структуру та геоекологічний стан [79].

Починаючи з 2014 року, територія України зазнає збройної агресії з боку російської федерації, що розпочалася з окупації Автономної Республіки Крим та ескалації бойових дій на сході в межах Донецької й Луганської областей. З 24 лютого 2022 року розпочалась російсько-українська повномасштабна війна, спрямована проти державного суверенітету, незалежності та територіальної цілісності України. Воєнні дії вже спричинили суттєві ландшафтні зміни на території України.

До початку повномасштабного вторгнення під окупацією перебувало близько 7% території України (орієнтовно 44 тис. км²). У ході активних бойових дій у 2022 році росія захопила додаткові території на півдні та сході країни, і на піку наступу влітку 2022 року під її контролем перебувало до 27% державної території (приблизно 160-170 тис. км² разом із довоєнними окупаціями). Завдяки контрнаступальним операціям Збройних сил України вдалося звільнити понад 45 тис. км², що зменшило площу окупації приблизно з 27% до 20% [43,78].

Станом на 25 лютого 2024 року лінія фронту в Україні становила близько 3200 км, із яких приблизно 1200 км охоплювали ділянки інтенсивних бойових дій [26]. Просторова інтенсивність військових процесів призводить до формування широкої смуги стійкого руйнівного впливу, який поширюється на 30–40 км углиб території по обидва боки лінії зіткнення. У межах цієї зони фіксується масштабна деградація ґрунтового-рослинного покриву, руйнування

агроландшафтів, порушення гідрологічних процесів та трансформація природних екосистем.

Окрім безпосереднього ведення бойових дій, значна частина України замінована, що на період березня 2025 року складає 23% територій. Виявлено понад мільйон вибухонебезпечних предметів, які несуть екологічну та техногенну загрозу для природних ландшафтів, тваринного світу й населення країни [3].

З огляду на викладене вище, дослідження впливу воєнних дій на ландшафти є актуальним у сучасних умовах. Здійснення якісного та кількісного аналізу їх стану потребує використання сучасних інформаційних технологій, що забезпечують можливості просторового моніторингу, моделювання процесів деградації та подання результатів у вигляді цифрових карт.

Найбільш ефективним інструментарієм для вирішення цих завдань виступає поєднання геоінформаційних систем (ГІС) і даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які дають змогу комплексно оцінювати зміни земної поверхні протягом певного часу. Методи ДЗЗ забезпечують регулярне отримання об'єктивної інформації про стан території, тоді як ГІС-технології дозволяють узагальнювати, аналізувати та картографічно відображати наслідки воєнних дій на ландшафти [8].

Об'єктом дипломної роботи є ландшафти Балаклійської громади Харківської області.

Предметом роботи є просторово-часові зміни ландшафтів Балаклійської громади Харківської області внаслідок воєнних дій, встановлені засобами ГІС та ДЗЗ.

Мета роботи - дослідити просторово-часові зміни ландшафтів (на прикладі агроландшафтів) Балаклійської громади, спричинені воєнними діями, шляхом застосування методів ГІС-аналізу та ДЗЗ з використанням спектральних індексів.

Завдання:

- 1) охарактеризувати особливості ландшафтів Балаклійської громади та розглянути ландшафт як об'єкт ГІС-аналізу;
- 2) визначити аспекти впливу воєнних дій на ландшафти;
- 3) розкрити можливості застосування засобів ГІС та ДЗЗ для дослідження ландшафтів;
- 4) розробити алгоритм обробки супутникових даних у середовищі Google Earth Engine для виявлення порушень ландшафтів та обґрунтувати оптимальні значення спектральних індексів (NDVI, BSI) для ідентифікації змін ландшафтів;
- 5) здійснити аналіз, картографічну візуалізацію та просторову оцінку наслідків порушень сільськогосподарських ландшафтів Балаклійської громади внаслідок воєнних дій.

Методи дослідження охоплюють комплекс підходів дистанційного та геоінформаційного аналізу, зокрема: багатоспектральну обробку супутникових знімків Sentinel-2 у середовищі Google Earth Engine; індексне оцінювання стану рослинності, ґрунтового покриття за допомогою NDVI та BSI; статистичне визначення порогових значень для класифікації змін; класифікацію змін - зонування територій на основі ступеня перетвореності та деградації ландшафтів із подальшим картографуванням у ГІС. Додатково застосовувалися методи географічного аналізу для інтерпретації просторових закономірностей змін ландшафтів, а також порівняльно-геоекологічний підхід для оцінки масштабів деградації агроландшафтів Балаклійської громади під впливом воєнних дій.

Теоретико-методологічну основу дослідження склали автори відповідних публікацій, методичних посібників, підручників: Агапова О.Л., Сорокіна Л. Ю., Голубцов О. Г., Семеряга О.П., Негадайлов А.А., Масікевич Ю.Г., Шевчук Л.М., Герасимчук О.Л., Марюшко М. В.

Наукова новизна дослідження:

1) Вперше для Балаклійської громади здійснено комплексну оцінку трансформацій агроландшафтів, спричинених воєнними діями, на основі поєднання індексного аналізу (NDVI, BSI) та автоматизованої обробки супутникових знімків у середовищі Google Earth Engine.

2) Запропоновано науково обґрунтовані порогові значення індексів NDVI, BSI для виявлення порушень агроландшафтів у контексті впливу бойових дій.

3) Розроблено алгоритм просторового моделювання та класифікації ступеня порушень ландшафтів, який поєднує розрахунок спектральних індексів, статистичне визначення порогів для демаркації змін та подальше зонування території за ступенем деградації ландшафтів з використанням засобів ГІС.

4) Отримано вперше картографічні моделі оцінки ступеня пошкодження агроландшафтів Балаклійської громади, що дозволяють ранжувати території за рівнем деградації, а також надано рекомендації щодо пріоритетних задач по відновленню ландшафтів громади.

Практичне значення дослідження полягає у можливості застосування розробленої методики та отриманих результатів для моніторингу стану природних ландшафтів Балаклійської громади в умовах воєнного впливу та в ході післявоєнного відновлення. Запропонований підхід може бути використаний для оперативного картографування територій із різним ступенем екологічної деградації, визначення пріоритетних зон рекультивації та природоохоронних заходів, а також для підтримки управлінських рішень у сфері відновлення земель, планування просторового розвитку й оцінювання потенційних екосистемних ризиків. Методика може бути адаптована для інших територій України, що зазнали руйнування, пошкодження, деградації внаслідок бойових дій.

Дипломна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку

використаних джерел, що налічує 80 найменувань. Обсяг роботи становить 106 сторінок друкованого тексту. Робота містить 39 рисунків та 3 таблиці.

РОЗДІЛ І.

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРУШЕНЬ ЛАНДШАФТІВ НА ОСНОВІ ДАНИХ ДЗЗ ТА ГІС- ТЕХНОЛОГІЙ

1.1. Ландшафт як об'єкт геоінформаційного аналізу

Ландшафт завжди посідав одне з провідних місць у системі географічних понять, адже саме через нього відображається складна ієрархія взаємозв'язків між природними компонентами та суспільством, між процесами функціонування природних систем і напрямками господарського освоєння територій.

Історично поняття «ландшафт» еволюціонувало від описового трактування «краєвиду», що сприймається зорово, до наукової категорії, яка відображає закономірності територіальної диференціації природного середовища. Термін «ландшафт» було введено в наукову термінологію німецьким географом Олександром Гумбольдтом у ХІХ столітті. Учений розглядав його як «цілісний характер місцевості», підкреслюючи не лише зовнішні риси території, а й внутрішню єдність. У трактуванні О. Гумбольдта ландшафт виступає як природне цілісне утворення, у якому проявляються закономірності взаємодії природних компонентів. З другої половини ХХ століття, у зв'язку з розвитком системного підходу та концепцій геосистеми у географічну науку, представники радянської ландшафтознавчої школи ввели нове розуміння. «Ландшафт» доцільно трактувати як відкрита динамічна територіальна система, у якій взаємодія речовини, енергії та інформації забезпечує її саморегулювання та еволюцію [25]. У цьому контексті ландшафт має такі основні характеристики:

- структурна організація, що охоплює сукупність природних компонентів і взаємозв'язки між ними;
- функціональні властивості, пов'язані з обміном енергії, речовини та інформації;

- динамічність, яка проявляється у добових, сезонних і річних змінах стану системи;
- еволюційність, що відображає довготривалі процеси трансформації та розвитку ландшафтів.

Тобто, ландшафт розглядається не лише як природне утворення, а як геосистема, відкритість якої визначає її здатність реагувати на зовнішні впливи, зберігаючи при цьому внутрішню організацію та закономірності розвитку території [67].

Класифікація ландшафтів - це впорядкування та поділ ландшафтних систем відповідно до їхніх спільних характеристик. Налічується декілька основних підходів на яких ґрунтується поділ ландшафтів [25]:

- генетичний підхід, коли ландшафти групуються відповідно до спільного походження. Прикладом можуть бути алювіальні, льодовикові чи еолові;
- історичний підхід, де враховується період формування ландшафту, що дає змогу розрізняти давні (реліктові) та нові ландшафти;
- зональний підхід спирається на закономірності географічної зональності та широтної диференціації природи;
- структурний підхід - поділ здійснюється за особливостями внутрішньої будови та взаємозв'язку компонентів ландшафту;
- динамічний підхід, коли ураховуються процеси, які визначають зміни в ландшафті, зокрема заболочення, ерозія, акумуляція та інші форми перетворення.

Основні типи ландшафтів традиційно поділяють на рівнинні та гірські, у межах яких виокремлюють низку підтипів. До рівнинних належать низовинні та височинні ландшафти, тоді як гірські представлені передгірними, низькогірними, середньогірними, високогірними та міжгірно-улоговинними комплексами.

Поряд із природними типами важливе місце посідає поділ ландшафтів за характером антропогенного впливу [24]:

- агроландшафти - сільськогосподарські території, що зазнали значної трансформації внаслідок обробітку ґрунтів та агротехнічних заходів;
- лісогосподарські ландшафти - області, де активно здійснюється лісокористування;
- селітебні - території житлової забудови, включно з містами, селищами та пов'язаними з ними промисловими зонами;
- промислові - території з підприємствами, кар'єрами та іншими промисловими об'єктами;
- гідротехнічні - пов'язані з функціонуванням гідротехнічних споруд, таких як водосховища, дамби чи канали.
- меліоровані ландшафти - території, модифіковані шляхом осушення, зрошення або інших меліоративних робіт із метою покращення стану ґрунтів;
- рекреаційні - ландшафти, спеціально облаштовані або природно придатні для туризму, відпочинку й оздоровлення населення.

Ландшафтна організація території має ієрархічну будову, у якій природні комплекси різних рангів взаємопов'язані та підпорядковуються одне одному в межах єдиної територіальної системи. На найвищому рівні організації виділяють фізико-географічні країни, а на найнижчому - фації, які формують локальні природні комплекси. Між цими рівнями розташовані проміжні таксономічні одиниці - зони, провінції, області, райони, що відображають багаторівневу будову територіальної організації природи. Кожен ландшафт є елементом цієї складної системної ієрархії, взаємопов'язаної як вертикально, так і горизонтально.

Однією з властивостей ландшафту з позиції системного підходу є емерджентність - здатність ландшафту набувати нових якостей, не притаманних окремим його компонентам (частинам). Це означає, що ландшафт має інтегральні властивості, які не можна пояснити лише характеристиками його складових. Наприклад, стійкість ландшафту до антропогенних навантажень або

здатність до самовідновлення не можуть бути пояснені лише характеристиками ґрунтів, рослинності чи рельєфу - вони виникають у результаті їхньої взаємодії.

У межах системного підходу ландшафт аналізується з позицій термодинаміки як система, що постійно перебуває в обміні енергією з навколишнім середовищем. До зовнішніх джерел енергії належать сонячна радіація, гравітаційні сили, атмосферна циркуляція, тоді як внутрішні процеси проявляються через перетворення енергії: хімічну енергію ґрунтоутворення, механічну енергію ерозійних процесів тощо. Потоки речовини формують геохімічні та геофізичні ланцюги, які визначають просторово-функціональні зв'язки між компонентами ландшафту.

Не менш важливими є інформаційні процеси в межах ландшафту. Вони проявляються у збереженні та передачі «ландшафтної пам'яті» [25] - генетичної інформації рослин, слідів минулих кліматичних епох у ґрунтах, морфологічних ознак рельєфу, що фіксують історію розвитку ландшафту. Таким чином, ландшафт можна розглядати як інформаційно-енергетичну систему, що акумулює досвід природної еволюції території.

З контексту теорії систем, ландшафт має здатність до саморегуляції. У відповідь на зовнішні впливи (вирубка лісів, пожежі або зміна водного режиму) система прагне відновити динамічну рівновагу через механізми зворотних зв'язків. Негативні зворотні зв'язки стабілізують систему, зменшуючи відхилення, тоді як позитивні можуть призводити до формування нового стану рівноваги, тобто еволюційного оновлення ландшафту [25].

Представлення та дослідження ландшафту як складної геосистеми має широке прикладне значення, що проявляється у різних галузях діяльності людини. У сфері екологічного менеджменту такий підхід дає змогу прогнозувати наслідки антропогенних впливів, зокрема вирубки лісів, промислового забруднення, урбанізації чи трансформації природних ландшафтів, а також розробляти ефективні заходи охорони й відновлення природних комплексів. У сільському господарстві ландшафтний підхід сприяє оптимізації агротехнічних

рішень завдяки врахуванню рельєфу, типів ґрунтів, особливостей водного режиму та мікрокліматичних умов, що забезпечує раціональне землекористування, збереження родючості ґрунтів та запобігання ерозійним процесам. У містобудуванні та просторовому плануванні розгляд ландшафту як геосистеми створює передумови для формування стійких урболандшафтів: планування територій здійснюється не лише з огляду на функціональні потреби забудови, а й відповідно до природних обмежень і потенціалів місцевості. Системний аналіз дозволяє оцінювати наслідки втручань, зокрема ущільнення забудови чи зміни поверхневого стоку, для мікроклімату, біорізноманіття та ґрунтово-гідрологічних процесів, що в результаті сприяє зменшенню екологічних ризиків і підвищенню комфортності та естетичної якості міського середовища. У природоохоронному плануванні та територіальному управлінні геосистемний підхід допомагає визначати межі екологічно вразливих зон, формувати природно-заповідні території та забезпечувати сталий розвиток регіонів з урахуванням їхніх ландшафтних особливостей [25].

Ландшафт як територіальна система характеризується певними структурно-функціональними компонентами та закономірностями їх взаємодії. Компоненти можна поділити на 2 категорії: природні (геологічна основа та форми рельєфу, гідрографічна мережа, ґрунтово-рослинний покрив, кліматичні умови, тваринний світ) та антропогенні (типи землекористування, особливості інфраструктури, соціально-економічні фактори (рис.1.1)).



Рис.1.1. Структурно-функціональні компоненти ландшафтів (укладено автором за даними [23])

Рельєф визначає характер стоку, ерозійні процеси й мікроклімат, рослинність і ґрунти формують екологічний баланс території, а антропогенні чинники змінюють природну структуру й функціональність ландшафтних комплексів. Такі взаємозв'язки виступають основними механізмами, що підтримують функціонування ландшафту як єдиної системи. Будь-які зміни окремого компонента спричиняють перебудову всієї системи, що особливо помітно в умовах сучасних глобальних кліматичних і антропогенних трансформацій, окрім цього в Україні масштабні зміни ландшафтів спричиняють воєнні дії.

Традиційно вивчення ландшафтів ґрунтувалося на польових дослідженнях: маршрутних обстеженнях, топографічних зйомках, морфологічному аналізі, натурних спостереженнях, геоботанічних та ґрунтових дослідженнях, гідрологічних та геоморфологічних вимірюваннях, картографуванні. Однак такі методи мають суттєві обмеження: вони трудомісткі, залежать від доступності території та не завжди дозволяють охопити великі площі або простежити зміни в часі. В регіонах проведення бойових дій, на тимчасово окупованих та замінованих територіях проведення польових досліджень є неможливим.

З розвитком цифрових технологій і ДЗЗ географічні дослідження отримали новий інструментарій - ГІС, які стали основою сучасного підходу до просторового аналізу ландшафтів. ГІС-технології стали ключовими інструментами для:

- картографування зон руйнувань і пожеж;
- виявлення ушкоджених сільськогосподарських полів;
- аналізу змін покриву й структурних властивостей ландшафтів;
- моніторингу динаміки відновлення природних комплексів.

Таким чином, значна складність та багатокomпонентність воєнного впливу обумовлюють необхідність переходу до розгляду інструментарію, який здатний забезпечити комплексний аналіз трансформацій ландшафтів у просторі й часі.

1.2. Наслідки впливу воєнних дій на ландшафти

Розвиток військової техніки у XX-XI століттях докорінно змінив характер впливу воєнних дій на ландшафти. Якщо раніше просторовий масштаб руйнувань був відносно локальним і обмежувався переважно фортифікаційними спорудами, то з удосконаленням озброєння, збільшенням потужності вибухових речовин, дальності артилерії та мобільності бойової техніки масштаби трансформацій стали глибшими, інтенсивнішими та більшими за територіальним охопленням. Особливо відчутним цей вплив став із появою важкої бронетехніки, реактивних систем залпового вогню, авіаційних і ракетних ударів, дронів-камікадзе, зброї дальнього ураження, що здатна завдавати значних ушкоджень навіть за межами лінії зіткнення.

Механічне навантаження від руху техніки, прокладання десятків тисяч кілометрів окопів і траншей, повторні вибухи високої потужності, техногенні пожежі та хімічні викиди, залишки розбитої техніки та витік з неї паливно-мастильних матеріалів, нерозірвані боєприпаси створюють новий тип антропогенного впливу, який за розміром перевищує більшість інших видів

людської діяльності [32]. В результаті формуються белігеративні ландшафти - територіальні комплекси, змінені внаслідок воєнних дій, військових навчань або випробувань зброї. Поняття «белігеративний ландшафт» було введено до наукового обігу Мільковим Ф. М. у 1974 році в праці «Людина і ландшафти». Учений запропонував виокремити ландшафтні комплекси, що виникають унаслідок військової діяльності, в окрему групу [34]. Розвиваючи цю ідею, Михайлов В. А. характеризує белігеративні ландшафти як специфічний тип військово-інженерних комплексів, сформованих у результаті трансформації природного середовища або штучного створення з використанням спеціальних матеріалів. До таких комплексів він відносить елементи військової інфраструктури, а також утворення, що виникають під час бойових дій [34].

У свою чергу, Семеряга О.П. уточнює зміст поняття, визначаючи белігеративний ландшафт як різновид антропогенних ландшафтів, що формується внаслідок військової діяльності. Такі ландшафти являють собою поєднання природно-територіального комплексу з інженерними спорудами, призначеними для укритего розміщення й ефективного застосування озброєння, військової техніки та пунктів управління, а також для захисту військових підрозділів, населення й об'єктів тилу від ураження противника [37].

Белігеративні ландшафти виділяють за походженням, тобто їх формує саме військова діяльність: бойові дії, фортифікаційні роботи, навчання військ або підготовка до них. Їх також визначають за наявністю воєнно-інженерних об'єктів (окопів, бліндажів, укріплень, позицій техніки) та за трансформацією природного середовища, спричиненою вибухами, переміщенням техніки та іншим силовим впливом [51].

Кожен тип впливу воєнних дій (рис.1.2.) має власну природу, інтенсивність та часову динаміку, а їхні практичні наслідки суттєво відрізняються залежно від характеру бойових дій, природних умов та рівня антропогенного навантаження.



Рис.1.2. Основні типи впливу воєнних дій на ландшафти (укладено автором)

Механічне руйнування земної поверхні є однією з найбільш виражених форм впливу бойових дій на ландшафти, що особливо негативно відображається на ґрунтовому та рослинному покриві. Такий вплив виникає миттєво, але його наслідки є довготривалими, адже перебудова мікрорельєфу зберігається роками. Також вибухи боєприпасів вбивають тварин, порушують їх спокій, знищують середовище існування, призводять до вимушеної міграції на інші території. Вибухи снарядів, авіабомб і ракет, прокладання окопів, траншей, бліндажів, будівництво технічних доріг та переміщення важкої бронетехніки призводять до деструкції, переміщення та зміни морфології верхніх горизонтів ґрунту й мікрорельєфу.

На полях утворюються густі системи вирв, насипів, техногенних валів та вимоїн, які:

- порушують природний стік води;
- сприяють локальному перезволоженню та заболоченню;
- посилюють схилу ерозію;
- змінюють мікрокліматичні умови агроландшафтів;
- ускладнюють або повністю унеможливають механізовану обробку полів [68].

Відновлення рослинного покриву триває від одного сезону до кількох років, тоді як глибокі вирви можуть залишатися у структурі рельєфу десятиліттями.

Паралельно відбувається хімічне забруднення ґрунтів, вод і атмосферного повітря. Продукти горіння пального, вибухові речовини, важкі метали, залишки ракетного палива, нафтопродукти, токсичні сполуки зі зруйнованих промислових об'єктів та інфраструктури - усе це утворює складний токсичний комплекс, що проникає в ґрунтові горизонти та водні системи. Вплив такого забруднення короточасний у моменті формування, але надзвичайно тривалий за наслідками, оскільки токсиканти здатні накопичуватися роками. За даними Програми ООН з навколишнього середовища (United Nations Environment Programme), війна в Україні спричинила сотні випадків екологічно небезпечних аварій: руйнування нафтобаз, складів хімікатів і добрив, газових об'єктів, шахт, розподільних труб, підприємств з переробки сільськогосподарської продукції [12,77]. Період природного самоочищення таких територій вимірюється десятиліттями.

Одним із найсерйозніших наслідків війни є мінно-вибухове забруднення територій. Україна вважається однією з найбільш замінованих країн світу. Потенційно 23% її території перебувають під загрозою забруднення мінами та нерозірваними боєприпасами, значна частина яких припадає на сільськогосподарські землі та землі лісового фонду. Міни мають миттєвий механізм впливу, але їхня дія є надтривалою, адже вони залишаються небезпечними десятки років. Як наслідок поля роками не обробляються, заростають, деградують, а сам процес очищення територій є тривалим і потребує значних фінансових затрат [65]. Термін відновлення таких територій повністю залежить від темпів розмінування і може сягати десятки років.

Ще одним чинником воєнного впливу є пожежі, спричинені обстрілами, вибухами та неможливістю гасіння в умовах бойових дій. Дана трансформація проявляється у:

- знищені лісів;
- повному знищенні посівів;
- деградації гумусового шару;
- активації ерозійних процесів;
- зниженні біологічної активності ґрунту;
- руйнуванні структури ґрунтової підстилки.

Пожежі мають раптовий характер, але наслідки для ґрунту й біоти є довготривалими, оскільки така деградація створює ефект «вигорання родючості» ґрунтів, яка відновлюється не один сезон [76].

Крім того, масштабні пожежі, вибухи та руйнування інфраструктури супроводжуються значними викидами парникових газів, що впливають не лише на місцеві екосистеми, а й на глобальні кліматичні процеси: за три роки війни їх обсяг перевищив 230 мільйонів тонн CO₂-еквіваленту [42].

Воєнні дії змінюють функціональне використання ландшафтів. Частина територій перетворюється на «сіру зону» - це ділянка території шириною 25-30 км, із обмеженим або забороненим доступом (міновані поля, фронтові смуги, зони руйнувань) (рис. 1.3). Мірою збільшення дальності ураження різних типів озброєння, особливо FPV-дронів, розмір «сірої зони» має тенденцію до зростання.

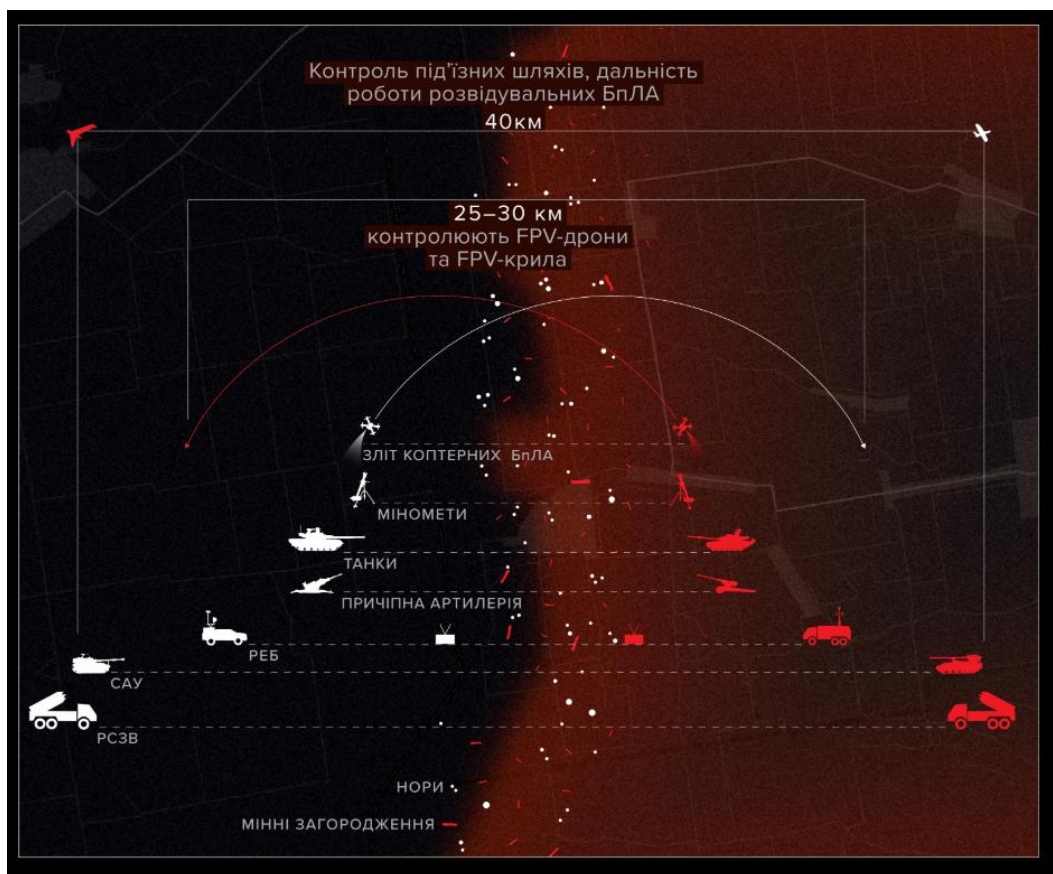


Рис.1.3. Схема сірої зони [44]

Формування таких зон спричиняє соціально-економічні трансформації, які охоплюють зміни у структурі господарської діяльності, зайнятості населення, доступності ресурсів, інфраструктурі. Цей вплив має високу інтенсивність, оскільки руйнування економічних об'єктів, логістичних ланцюгів і соціальної інфраструктури відбувається протягом короткого часу, тоді як наслідки проявляються довготривало, у вигляді скорочення виробництва, депопуляції, занепаду аграрних територій, втрати робочої сили та зниження інвестиційної привабливості. Часова динаміка таких процесів характеризується швидким настанням кризової фази та повільним, багаторічним відновленням, що напряду впливає на стан та функціонування ландшафтів.

Відповідно до викладеного вище, у межах загальної структури території виділяється багато типів ландшафтів, кожен з яких має власні морфологічні й функціональні особливості та по-різному реагує на зовнішні впливи. Дослідження всіх можливих змін у такому різноманітті ландшафтів охоплює

широкий комплекс завдань і потребує багаторівневого методичного підходу. З огляду на це, у даному дослідженні в експериментальній частині увагу було зосереджено лише на окремих аспектах цього переліку, а саме на аналізі агроландшафтів, які є переважаючими на території Балаклійської громади.

1.3. Застосування геоінформаційних систем (ГІС) і дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у наукових дослідженнях стану та змін ландшафтів

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується інтенсивним переходом до інформаційної моделі, у якій цифрові технології стають ключовим інструментом функціонування різних сферах людської діяльності. У наукових дослідженнях це спричинило широке впровадження методів просторового аналізу та комп'ютеризованих підходів у географічні дослідження. У цьому контексті особливого значення набувають ГІС та технології ДЗЗ, які забезпечують можливість отримання, інтерпретації та інтеграції даних про стан ландшафтів на різних масштабних рівнях.

ГІС - це комплекс апаратних і програмних засобів із алгоритмічними процедурами, що забезпечують збирання, введення, зберігання, математико-картографічне моделювання та візуальне представлення геопросторових даних [30].

ДЗЗ - це процес отримання інформації про поверхню планети за допомогою сенсорів, розміщених на космічних апаратах та інших літальних пристроях, які дають можливість фіксувати зміни й простежувати динаміку процесів на земній поверхні та над нею [16].

Методи ДЗЗ та ГІС забезпечують умови для регулярного і комплексного аналізу змін на великих територіях, незалежно від безпосереднього доступу до них. Використання мультиспектральних, гіперспектральних і радарних супутникових знімків дозволяє проводити глибокий аналіз змін у покритті земної поверхні, фіксувати знищення рослинного покриву, зміни у водному

балансі, руйнування об'єктів інфраструктури, забруднення ґрунтів та інші процеси [49].

ГІС забезпечує платформу для зберігання, обробки, аналізу та візуалізації просторових даних. Завдяки ГІС-аналітиці можна створювати тематичні карти впливу бойових дій на природне середовище, здійснювати просторове моделювання ризиків, інтегрувати дані про пошкодження з соціально-економічними показниками. У цьому аналітичному підході важливу роль відіграють спектральні індекси, що розраховуються на основі супутникових знімків, оскільки саме вони дають змогу кількісно оцінити стан поверхні Землі та визначати характер її просторових змін.

Зокрема, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) використовується для визначення загального рівня біомаси та фотосинтетичної активності рослинності. GNDVI (Green NDVI) є його модифікацією, чутливішою до вмісту хлорофілу та водного стресу, тоді як NDRE (Normalized Difference Red Edge Index) ефективно відображає стан густої та зрілої рослинності завдяки використанню red-edge діапазону. Для корекції впливу відкритого ґрунту застосовується SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), що забезпечує точніше оцінювання рослинного покриття на територіях із низьким або неоднорідним озелененням.

Для виявлення підвищеної вологості та водних об'єктів використовують NDWI (Normalized Difference Water Index), тоді як NBR (Normalized Burn Ratio) застосовується для ідентифікації вигорілих територій та фіксації наслідків пожеж. Окрему роль відіграє BSI (Bare Soil Index), що дозволяє оцінити рівень відкритості ґрунту та виокремити території зі слабким рослинним покривом, деградацією ґрунтів або активною господарською діяльністю [66].

Зважаючи на природні особливості досліджуваної території та спектральні можливості супутника Sentinel-2, у даному дослідженні для подальшої обробки та аналізу було обрано два індекси - BSI та NDVI, як найбільш інформативні для оцінювання стану агроландшафтів Балаклійської громади.

Однією з ключових можливостей технологій ДЗЗ є аналіз просторово-часової динаміки об'єктів із урахуванням ретроспективних даних. Моніторинг ландшафтних змін здійснюється порівнянням багаточасових супутникових знімків (до та після впливу) шляхом побудови різницевих зображень (change detection), що дозволяє детально вивчати та виявляти зміни як коротко, так і довготривалих часових інтервалах [6]. Наприклад, підрив Ірпінської (Козаровичської) дамби 26 лютого 2022 року став прикладом цілеспрямованого гідротехнічного втручання в ландшафт з метою стримування воєнного наступу. Українські військові, усвідомлюючи стратегічну небезпеку просування російських військ вдалися до тактики «гідравлічної війни» - навмисного затоплення територій (рис.1.4).

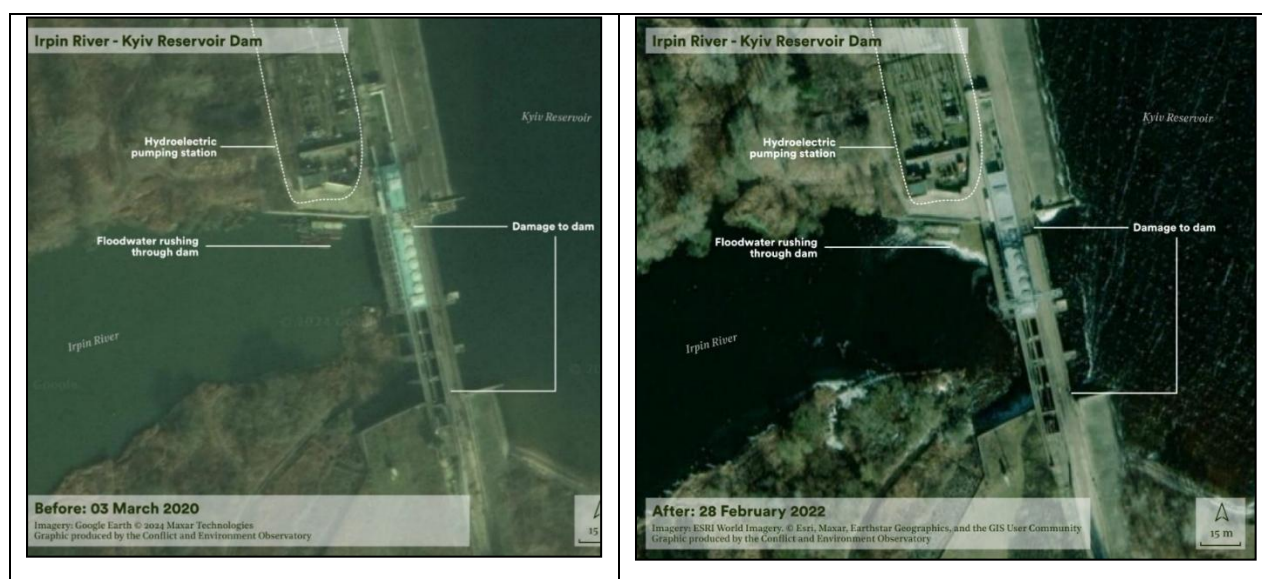


Рис.1.4. Ірпінська дамба у двох часових проміжках: до 3 березня 2020 року та 28 лютого 2022 року [56]

Внаслідок підриву дамби було затоплено понад 2800 гектарів заплави річки Ірпінь, створивши серйозну перешкоду для важкої техніки противника. Російські війська не змогли ефективно використати понтонні переправи через розмитий і заболочений ґрунт (рис.1.5), втратили частину техніки, змушені були

змінити тактику, перейти до затяжних вуличних боїв, що знизило темпи наступу на Київ.

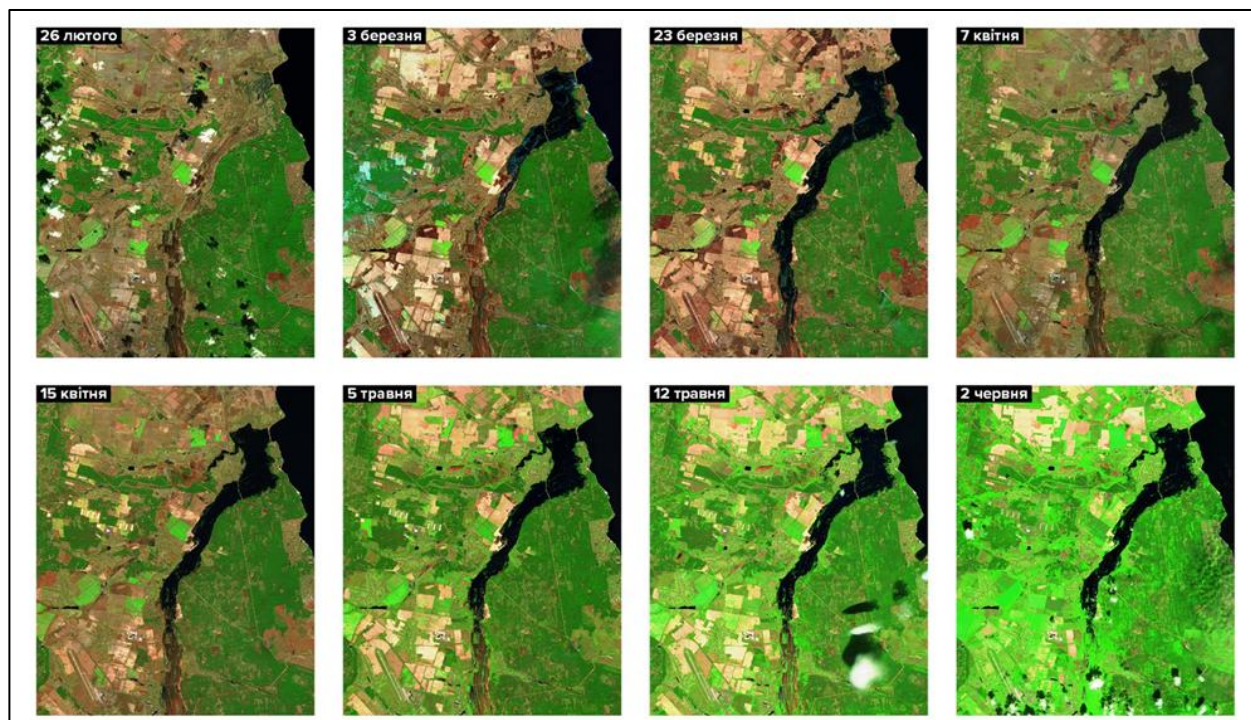


Рис.1.5. Розлив у долині р.Ірпінь, 2022 рік [5]

Водночас це втручання спричинило значні екологічні наслідки: були затоплені сільські населені пункти (зокрема Козаровичі й Демидів), сільськогосподарські поля, луки, ліси, а також порушено гідрологічний режим території. Вода принесла забруднення з паливо-мастильними матеріалами, відходами інфраструктури та мікроелементами з черепашкових кар'єрів. Ландшафт зазнав суттєвого впливу, що стало предметом аналізу фахівців з геоекології та моніторингу змін на основі супутникових знімків. Зафіксовано тривале затоплення територій, яке зберігалось до листопада 2022 року [5].

Отже, таке дистанційне спостереження дозволяє оцінити та проаналізувати екологічні наслідки для певної території.

Методика моніторингу змін передбачає кілька ключових етапів:

- визначення цільових територій;
- підбір джерел даних ДЗЗ (наприклад, супутникових знімків Sentinel-2, Landsat-8/9);

- попередня обробка даних (калібрування, атмосферна корекція);
- розрахунок спектральних індексів за інформативними каналами;
- побудова різницевих зображень;
- виявлення змін за допомогою алгоритмів класифікації та аналізу трендів;
- візуалізація та інтерпретація результатів у середовищі ГІС.

Використання таких програмних платформ, як QGIS, ArcGIS Pro, Google Earth Engine, значно пришвидшує і автоматизує процес аналізу [60].

У сучасному світі особливої уваги набуває інтеграція результатів ГІС-аналізу з даними польових спостережень, екологічного моніторингу та результатами залучення населення до збору даних. Наприклад, екологічні дані, зібрані волонтерами на платформах:

- EcoAction - громадська організація, що об'єднує фахівців і активістів, зосереджених на захисті довкілля та участі у формуванні екологічної політики [9].
- SaveEcoBot - поєднує дані про забруднення, забруднювачів та інструменти захисту довкілля. Їх основна мета - підвищити рівень екологічної безпеки в країнах, що розвиваються, забезпечивши населення доступними та відкритими даними про якість атмосферного повітря й іншими екологічними показниками, що сприятиме формуванню більшої екологічної поінформованості громадян [18].
- ЕкоЗагроза - офіційна платформа Міністерства захисту довкілля. Вона слугує уніфікованим інструментом для збору, реєстрації та передачі даних про екологічні небезпеки, відображаючи їх у режимі реального часу з просторовою прив'язкою до конкретних територій [19].

Такий підхід забезпечує перевірку достовірності результатів та їх подальше використання у формуванні сталого відновлення територій.

Одним із найпоказовіших прикладів практичного використання ГІС і ДЗЗ у ландшафтознавчих дослідженнях є створення цифрової середньомасштабної ландшафтно-карти України у масштабі 1:500 000. Цей проєкт став результатом

багаторічної роботи фахівців Інституту географії НАН України, спрямованої на розроблення методології геоінформаційного картографування ландшафтів та формування національної бази геоданих про природні комплекси.

Метою дослідження було не лише створення оновленої цифрової карти, а й розроблення науково обґрунтованих підходів до інтеграції ГІС та ДЗЗ у процесі аналізу ландшафтної структури території. В основі роботи лежало поєднання традиційних методів польового ландшафтного картографування з новітніми інструментами просторового аналізу, автоматизованого оброблення зображень і класифікації даних ДЗЗ [38]. ГІС, у межах якої створювалася карта, була побудована за принципом відкритої бази просторових даних, де кожен ландшафтний комплекс подавався як окремий полігон із повним набором атрибутів - морфологічних, геологічних, ґрунтових, рослинних, гідрологічних та антропогенних характеристик. Просторова база даних формувалася у середовищі ArcGIS for Desktop 10.x, що дозволило виконати геообробку, оверлей-аналіз (передбачає накладання двох чи більше шарів просторових даних для створення нового шару, який містить графічну композицію (графічний оверлей) та атрибутивну інформацію з усіх вихідних шарів), автоматизоване укладання контурів і класифікацію територіальних одиниць за параметрами природних умов [31].

Важливим етапом робіт з укладання середньомасштабної ландшафтною карти України стало використання матеріалів ДЗЗ, зокрема багатоспектральних супутникових знімків програм Landsat (USGS/NASA). Ці дані застосовувалися для ідентифікації типів землекористування, оцінки ступеня антропогенного перетворення ландшафтів і визначення сучасного стану природного покриву. Супутникові зображення пройшли попередню радіометричну та геометричну корекцію, після чого використовувалися для побудови растрових шарів, що інтегрувалися у ГІС «Ландшафти України» (рис.1.6.).

На основі цифрових моделей рельєфу (ЦМР) здійснювалося морфометричне моделювання поверхні: визначалися параметри крутизни,

експозиції та глибини розчленування схилів, що є провідними чинниками формування морфологічних типів місцевостей. Використання таких даних у поєднанні з геологічними, ґрунтовими й біотичними показниками дало змогу виділити операційні ландшафтні одиниці - місцевості та складні урочища, які стали базовими об'єктами середньомасштабного картографування.

Крім того, у процесі дослідження було автоматизовано процедури оброблення і верифікації даних. Для запобігання помилкам і забезпечення цілісності інформації у базі геоданих застосовувалися атрибутивні домени та підтипи, що обмежували допустимі значення параметрів для кожного типу об'єктів. Було реалізовано топологічний контроль геометрії, який унеможлиблював накладання полігонів і дозволяв зберегти коректні просторові зв'язки між елементами карти.

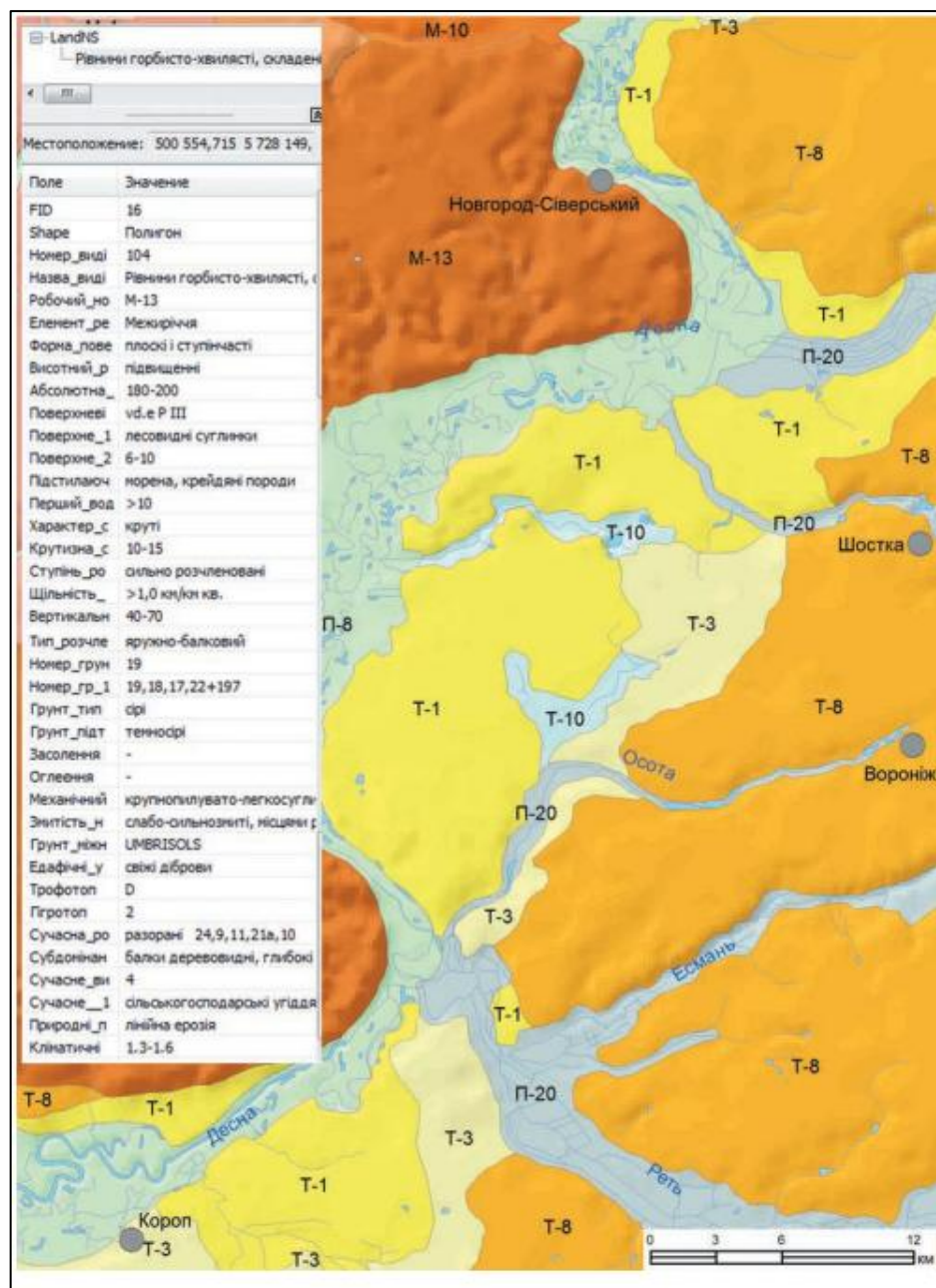


Рис.1.6. Ландшафтні комплекси Новгород-Сіверського Полісся (частина матеріалів): приклад структури атрибутивних полів карти основного блоку ГІС «Ландшафти України» [39]

Результатом виконаного дослідження стала карта, що відображає морфологічну структуру, типологічні особливості та антропогенну трансформацію ландшафтів, забезпечуючи просторову основу для аналізу природних умов, оцінювання екологічного стану територій і планування природокористування. Практичне значення цього прикладу у тому, що він довів

ефективність поєднання геоінформаційних і дистанційних методів для вивчення складних територіальних систем. Застосування ГІС і ДЗЗ дозволило перейти від статичного картографування до динамічного просторового аналізу ландшафтів, у межах якого можна оцінювати зміни в структурі земного покриву, визначати зони деградації, виявляти природні коридори та прогнозувати розвиток геосистем.

Ще одним прикладом є дослідження пожеж, спричинених воєнними діями, у природних лісових комплексах України. Унаслідок бойових дій значні території українських ландшафтів стали недоступними для польових досліджень через окупацію, замінування та активні обстріли, що обумовило необхідність використання супутникових даних як єдиного джерела просторової інформації.

У дослідженні використано дані мультиспектральних сенсорів MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) та VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), інтегровані через європейську геоінформаційну платформу EFFIS (European Forest Fire Information System). Ці системи дозволили здійснювати оперативний моніторинг активних пожеж у режимі майже реального часу, а також проводити аналіз вигорілих територій. У дослідженні були проаналізовані дані про пожежі та вигорілі ділянки в Україні за період 2022-2023 рр. Просторове поєднання з супутниковими знімками Sentinel-2 та картографічними шарами лісового фонду забезпечило можливість створення високодеталізованої ГІС-моделі поширення пожеж у природних лісових ландшафтах України [1].

Основою методики визначення пожеж стали спектральні зміни у NIR- та SWIR-діапазонах. Зменшення вмісту хлорофілу та вологості рослинності внаслідок горіння призводить до різкої зміни коефіцієнтів відбиття, що дозволяє застосовувати такі індекси як NBR і dNBR (Differenced (or delta) Normalized Burn Ratio) для картографування вигорілих територій та оцінки інтенсивності пошкоджень. Використання цих індексів дало можливість автоматизовано виділити площі з найвищим ступенем деградації лісових екосистем.

ГІС-технології забезпечили інтеграцію отриманих супутникових даних із багат шаровими картографічними матеріалами, включно з цифровими моделями рельєфу, даними про ПЗФ та актуальними контурами лінії фронту. Створена ГІС-модель дозволила простежити просторову кореляцію між поширенням пожеж і зонами активних бойових дій, а також встановити часову динаміку інтенсивності загорянь, що збігалася з фазами військових операцій.

Дані EFFIS щодо активних пожеж та площ вигорілих територій у 2021-2022 роках засвідчують, що у 2022 році масштаби пожеж в Україні істотно зросли порівняно з попереднім періодом (рис.1.7.). Наприклад, у лютому-березні 2022 року різке зростання кількості пожеж було зафіксовано у Київській, Чернігівській та Житомирській областях, тоді як у травні-червні 2022 року максимальні показники спостерігалися на Луганщині, Харківщині та півночі Донеччини.

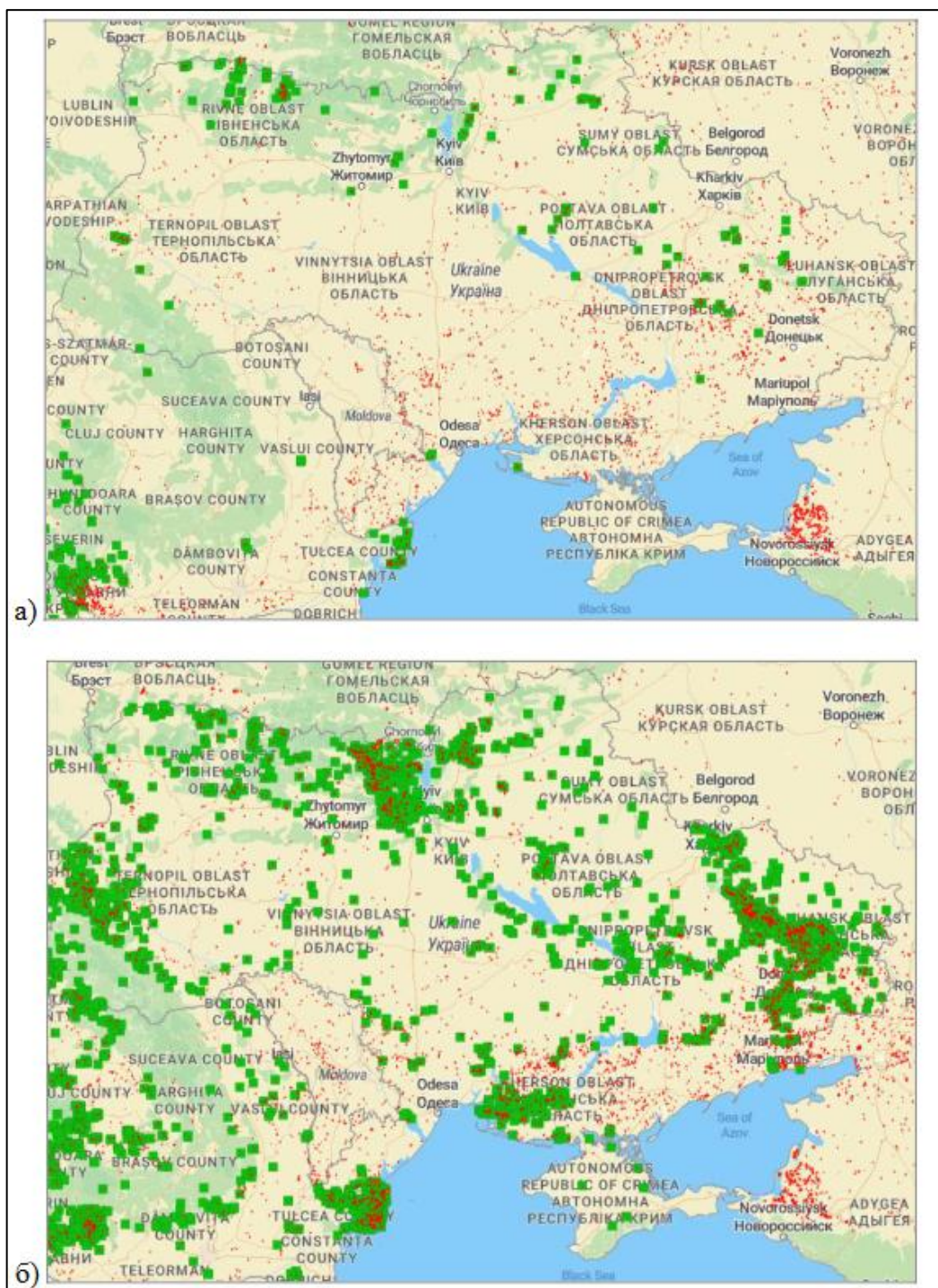


Рис.1.7. Розповсюдження пожеж (зелений колір) і зон вигорілих територій (червоний колір) в Україні у 2021 році (а) та 2022 році (б) [1]

Картографічні матеріали, створені на основі ГІС-аналізу, дали змогу визначити ключові осередки деградації лісових ландшафтів, зокрема у Чорнобильському радіаційно-екологічному заповіднику, НПП «Святі Гори», Серебрянському лісі, лісових масивах Ізюмського та Кременського лісгоспів, у

дельті Дніпра на Херсонщині. За даними супутникового моніторингу, у деяких регіонах постраждали десятки тисяч гектарів природних лісових екосистем, а площа вигорілих ділянок збільшилася у десятки разів порівняно з довоєнними показниками.

Таким чином, ландшафт у межах геоінформаційного підходу виступає як інформаційна модель геосистеми, що відображає закономірності просторової організації природи та взаємодію її компонентів. Поєднання класичних методів ландшафтознавства з ГІС-технологіями створює потужну наукову основу для моніторингу стану довкілля, оцінки природних ресурсів, оптимізації землекористування та планування сталого розвитку територій.

РОЗДІЛ II.

ТЕРИТОРІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ. ДЖЕРЕЛА ДАНИХ ТА МЕТОДИКА ЇХ АНАЛІЗУ

2.1. Географічна характеристика та природно-ландшафтні особливості Балаклійської громади

Харківська область розташована на північному сході України та охоплює площу близько 31,4 тис. км², що становить 5,2 % території держави. Вона включає 7 районів: Богодухівський, Ізюмський, Берестинський (Красноградський), Куп'янський, Лозівський, Чугуївський, Харківський, які поділяються на 56 територіальних громад. Адміністративним центром регіону є місто Харків (рис.2.1).

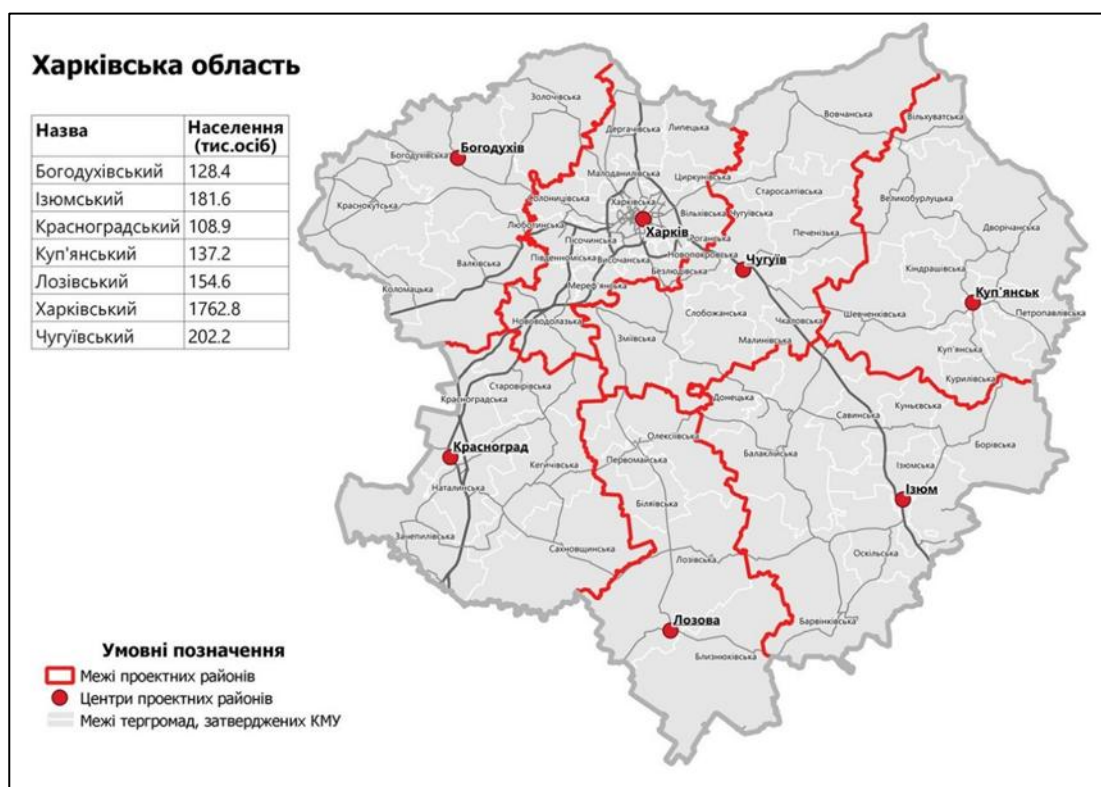


Рис.2.1. Адміністративний поділ Харківської області станом 01.01.2022 р.

Харківська область знаходиться на межі двох природних зон - лівобережного лісостепу та степової зони, що зумовлює різноманітність ландшафті, які представлені поєднанням лісостепових, степових, лісових, заплавно-болотних та антропогенно трансформованих ландшафтів, що формують складну й різноманітну територіальну організацію. У лісостеповій зоні переважають хвилясті лесові рівнини з дубовими дібровами, фрагментованими лучно-степовими ділянками та розгалуженими долинно-терасовими комплексами Сіверського Дінця й його приток. Степові ландшафти поширені на південному сході та відзначаються типовими та сухостеповими формами з чорноземами, ковилово-типчакова рослинністю та густою балково-яровою мережею. Значну роль відіграють водно-болотні комплекси та заплавні ліси, зосереджені переважно в річкових долинах, де формуються унікальні екосистеми піщаних терас і старичних озер. Водночас антропогенно змінені ландшафти - аграрні, урбанізовані, техногенні та воєнно порушені - становлять найбільш динамічний компонент, що суттєво визначає сучасний стан та еволюцію природно-географічного середовища області [17].

Регіон лежить у межах вододільної смуги між басейнами Дону та Дніпра, що визначає розгалужену гідромережу, налічується 156 річок протяжністю понад 10 км. Найбільшими є Сіверський Донець - 380 км, Оріль із довжиною близько 200 км та Оскіл, що простягається на 177 км (саме у межах області).

Клімат помірно-континентальний, із жарким літом та холодною зимою, що формує сприятливі умови для соціально-економічного розвитку [7].

Близькість Харківської області до державного кордону та наявність важливих транспортних вузлів, промислових підприємств і стратегічних об'єктів зробили область однією з головних цілей наступу РФ у 2022 році. Протягом перших тижнів війни російські війська зайняли значні території південної та східної частини регіону. Населені пункти піддавалися масованим обстрілам артилерією, авіаударам та атакам реактивних систем залпового вогню.

Балаклійська громада є показовим прикладом регіону, де бойові дії спричинили масштабні ландшафтні та соціально-економічні трансформації.

Територія Балаклійської громади, відповідно до сучасного адміністративно-територіального устрою України, входить до складу Ізюмського району Харківської області та займає площу 1,296 тис. км² (рис.2.2). Відстань від Балаклії до обласного центру становить близько 84 км залізницею та 101 км автомобільними шляхами. Місто Балаклія розташоване приблизно за 64 км від району активних бойових дій у місті Куп'янськ і за 100 км від державного кордону з російською федерацією [40]. Балаклійська громада перебувала під російською окупацією з 2 березня по 8 вересня 2022 року, упродовж яких її територія опинилась безпосередньо на стику активних бойових дій. Лінія фронту протягом весни-літа 2022 року проходила вздовж східних та південно-східних околиць громади, періодично зміщуючись у напрямку Ізюма, що спричинило значні руйнування інфраструктури й агроландшафтів. Під час контрнаступу Збройних сил України у вересні фронт швидко змістився на схід, що дозволило звільнити Балаклію та відкрило можливість для подальшої оцінки воєнних порушень території [14].

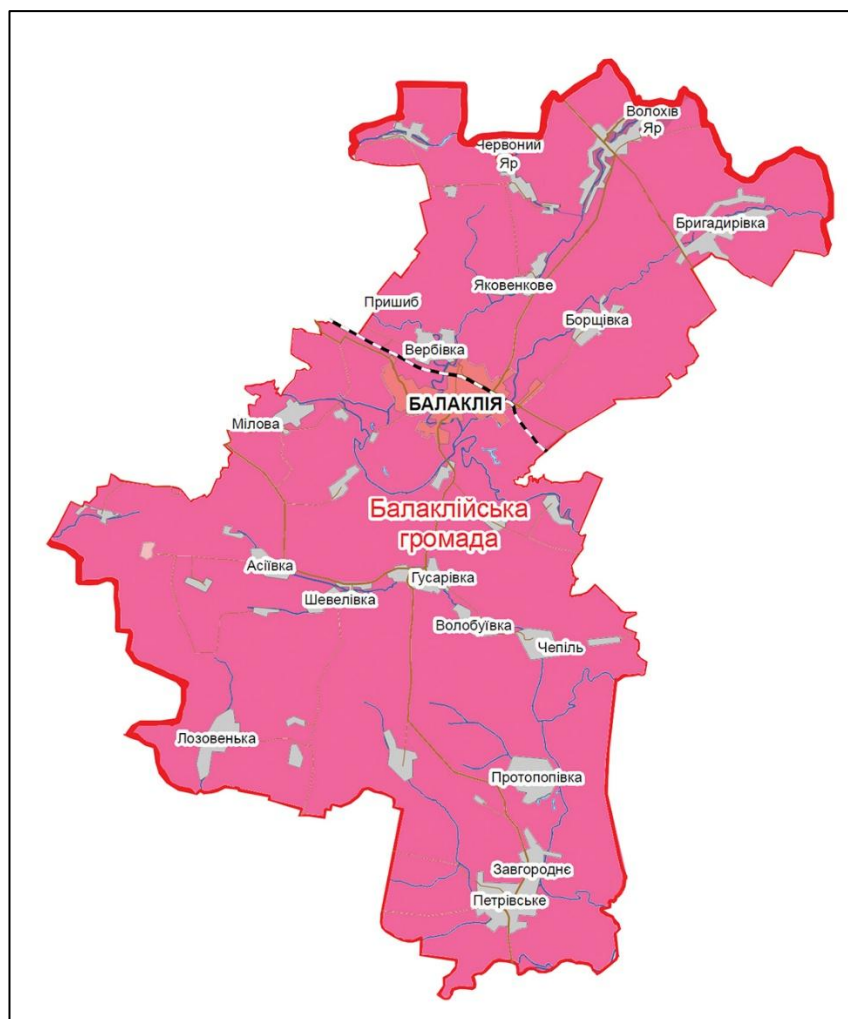


Рис.2.2. Балаклійська міська громада [21]

У структурі природно-ресурсного потенціалу громади провідне місце займають земельні та мінерально-сировинні ресурси. Орографічні умови Балаклійської громади формуються переважно хвилястими лесовими рівнинами, які належать до південних відрогів Середньоруської височини та характеризуються м'яко розчленованим рельєфом. Територія має загальний ухил у напрямку долини річки Сіверський Донець, що зумовлює розвиток балкових систем, схилових комплексів та локальних ерозійних форм. Абсолютні висоти коливаються в межах 60–170 м, причому підвищені ділянки займають міжрічкові плато, а знижені - широкі заплави та надзаплавні тераси. Ґрунтовий покрив представлений переважно чорноземами, тоді як у заплавах річкових долин поширені дерново-підзолисті, лучно-чорноземні та болотні ґрунти.

Загалом поєднання ґрунтових і кліматичних умов Балаклійського регіону є сприятливим для вирощування широкого спектра зернових і технічних культур, серед яких озима пшениця, кукурудза, овес, ячмінь, просо, гречка, горох.

Мінерально-сировинна база громади вирізняється значним різноманіттям корисних копалин: у межах території виявлені поклади природного газу, крейди, піску, суглинків, глин і кам'яного вугілля. Зокрема, у Петрівському старостинському окрузі розташоване родовище кам'яного вугілля, а в межах Чепільського - крейдяна скеля та Міловський каньйон. Важливим об'єктом цементної сировини є Шебелинське родовище.

Головною водною системою громади є річка Сіверський Донець - основна водна артерія на сході України, яка належить до басейну Дону. Уздовж її заплави та долин її приток: Волоської та Середньої Балаклійки, Берек і Чепільки сформувалися значні лісові масиви. У цих же районах зосереджена велика кількість озер, що створює сприятливі передумови для рекреаційного використання території. Лісові ресурси громади представлені масштабними площами соснових і листяних лісів, які відіграють важливу роль у підтриманні екологічної рівноваги регіону. Тут розташовано 11 об'єктів природно-заповідного фонду місцевого значення. Серед них найбільшими є ландшафтний заказник місцевого значення «Крейдянська лісова дача» та регіональний ландшафтний парк «Ізюмська лука».

Клімат Балаклійської громади належить до помірно-континентального типу, характеризується відносно холодною зимою та тривалим, місцями посушливим і спекотним літнім періодом. Середні температури становлять близько -5°C у січні та $+23^{\circ}\text{C}$ у липні, а атмосферна посуха є досить поширеним явищем і може спостерігатися кілька разів протягом року. За умов сучасних кліматичних змін, що супроводжуються зменшенням доступних водних ресурсів, ці проблеми посилюються, проявляючись у погіршенні якості питної води, зниженні запасів поверхневих вод і поступовому виснаженні підземних горизонтів.

Природно-ландшафтна структура громади представлена переважно лісостеповими хвилястими рівнинами, які формують основу території. У межах цих ландшафтів виділяються урочища долин і заплав річок (Сіверський Донець, Балаклійка), що характеризуються лучно-болотними комплексами, піщаними та супіщаними терасами й ділянками заплавних лісів. Схилові й балкові урочища представлені лучно-степовими та чагарниковими угрупованнями, а на міжрічкових підвищеннях переважають агроландшафтні фації орних земель із чорноземами різної ступені еродованості. Структуру дрібномасштабних природних комплексів формують фації - найменші елементи ландшафту, які відображають локальні умови рельєфу, ґрунтів і зволоження: від піщано-борових ділянок у терасових зниженнях до фацій алювіальних луків, схилових чорноземів та техногенно змінених поверхонь, що значно поширилися після бойових дій [40].

Балаклійська громада зазнала значних пошкоджень під час повномасштабного вторгнення. З перших днів окупації було порушено функціонування місцевого самоврядування, заблоковано транспортне сполучення та обмежено доступ населення до базових послуг. У Балаклії та прилеглих населених пунктах одночасно було припинено електро-, газо- та водопостачання, спостерігався дефіцит продуктів харчування та ліків, що спричинило різке погіршення умов життєдіяльності.

Російські військові облаштовували свої позиції в житлових кварталах, на території шкіл і заводів, що створювало серйозну небезпеку для цивільного населення. На території громади тривалий час діяли незаконні місця утримання, відзначалися численні випадки затримань, катувань та примусу до співпраці. Значна частина жителів втратила житло: унаслідок ракетних та артилерійських ударів були пошкоджені майже чотири тисячі приватних будинків і понад дві сотні багатоквартирних споруд. Російські підрозділи вивели з експлуатації та пограбували лікарні, садки, школи, музичні заклади, бібліотеки, музеї, підприємства, а також приватні будинки та автомобілі [36].

За період окупації чисельність населення істотно скоротилася, евакуюючись до інших регіонів України та виїхавши за кордон. До війни кількість населення Балаклійської громади становила 45,5 тис. осіб. Після деокупації, що відбулася 8 вересня 2022 року, близько 10-12 тис. жителів залишалися в громаді. Але станом на 15 січня 2025 року цей показник становить 30 тис. осіб [15].

Окупація суттєво трансформувала територію Балаклійської громади, перетворивши значні площі її ландшафтів на небезпечні зони через масове застосування вибухових засобів ураження - мін, касетних боєприпасів, артилерійських снарядів, ракет, авіабомб і дронів-камікадзе. Лінія фронту у 2022 році протягом тривалого часу пролягала вздовж східної, південно-східної та частково південної частини громади, охоплюючи райони сіл Вербівка, Семенівка, Яковенкове, а також території між Балаклією та Ізюмом. Саме ці зони стали осередками найбільш інтенсивних бойових дій, що спричинило глибоке порушення природних комплексів.

У прифронтових урочищах сформувалися розгалужені системи окопів, траншей, бліндажів, позицій техніки та польових укріплень, які змінили мікрорельєф, зруйнували ґрунтово-рослинний покрив і спричинили виникнення локальних техногенно-трансформованих фацій. Лісові та лучно-степові урочища на схилах долин зазнали інтенсивного фрагментування, а агроландшафтні фації орних земель були пошкоджені вибухами та важкою технікою, що спричинило появу ерозійно-активних ділянок і порушених ґрунтів.

Не менш небезпечними стали водні об'єкти громади, зокрема окремі ділянки річки Сіверський Донець, річки Балаклійка та їхніх заплав, які зазнали забруднення уламками боєприпасів, паливом і технічними рідинами. Унаслідок бойових дій у водно-болотних урочищах утворилися локальні осередки вторинного замулення й евтрофікації, а також підвищився ризик потрапляння вибухонебезпечних предметів у русла та заплавні озера.

Після деокупації розпочався тривалий і надзвичайно складний процес очищення територій від вибухонебезпечних предметів, без якого неможливе відновлення нормального життя та повернення сільськогосподарського виробництва. За інформацією Балаклійської міської військової адміністрації, територія площею 84 тис. га вважалась потенційно замінованою. Розмінування територій стартувало відразу після звільнення громади. Станом на вересень 2024 року очищено близько 29,7 тис. га, з яких приблизно 350 га оброблено механізованими засобами. Піротехнічні підрозділи вже знешкодили понад 6,2 тис. вибухових предметів та обстежили майже 1,5 тис. об'єктів інфраструктури, узбіч доріг, ліній електропередач і приватних подвір'їв (рис.2.3)[27].

Найбільш забрудненими вибухонебезпечними предметами залишаються Гусарівський, Волохово-Ярський, Новогусарівський, Вербівський та Яковенківський старостинські округи. Саме там фіксується найбільша щільність залишків боєприпасів, нерозірваних снарядів та мінних полів. Одним з прикладів є інцидент, що стався 7 жовтня поблизу села Вербівка. Під час виконання польових робіт трактор наїхав на вибухонебезпечний предмет, унаслідок чого сталася детонація. Постраждав 47-річний водій, який отримав поранення і було пошкоджено техніку [29].

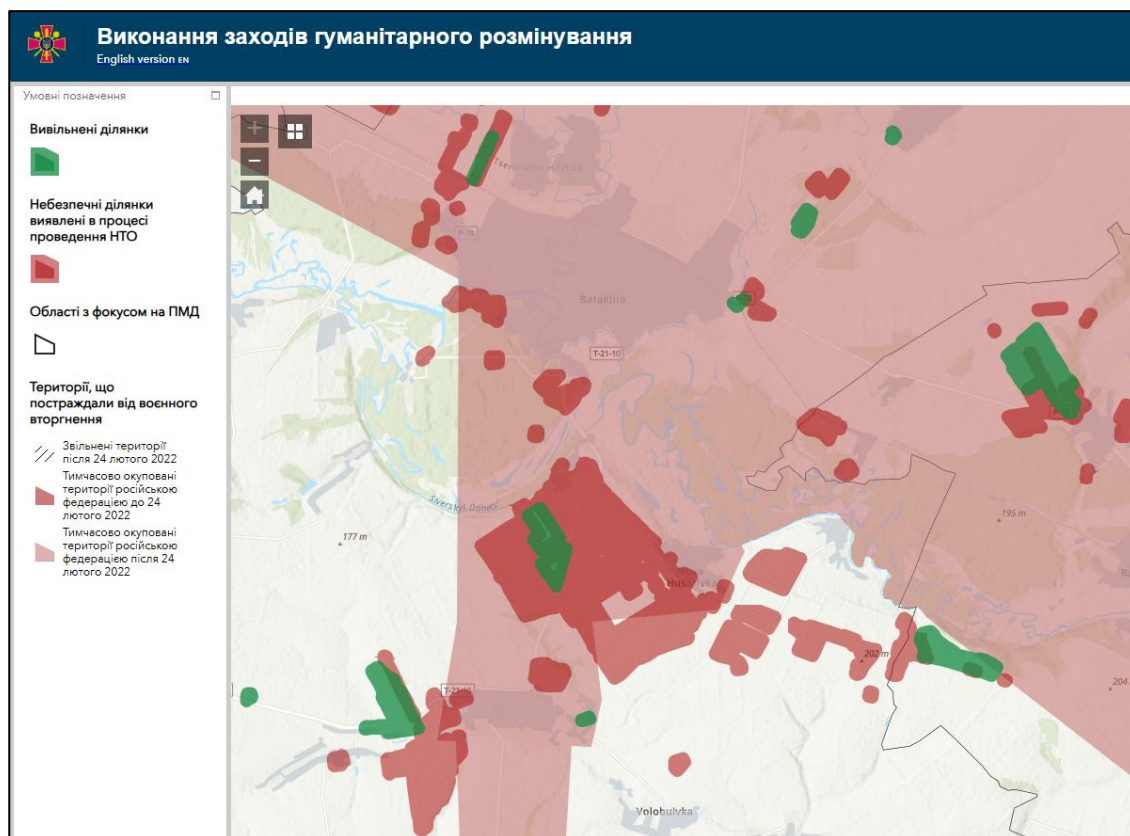


Рис.2.3. Небезпечні ділянки виявлені у процесі проведення нетехнічного обстеження територій [46].

Сільське господарство та агросектор відіграють важливу роль для Балаклійської громади, адже обробіток земель і агровиробництво були одними з провідних чинників економічної активності території. Земельні ресурси утворювали базу для зайнятості, доходів фермерів і агропідприємств. Тому додаткового обстеження й очищення потребують ще приблизно 45 тис. га земель сільськогосподарського призначення. Станом на момент листопада 2025 року у використанні перебуває близько 27,3 тис. га орних площ, які вже пройшли перевірку та очищення від вибухонебезпечних предметів. У той же час саперам ще належить перевірити значні площі лісів, ползахисних смуг, пасовищ і луків, де ризики залишаються високими [13].

У цих умовах дослідження просторових змін, характеру руйнувань і ступеня небезпеки у Балаклійській громаді набуває стратегічного значення. Наслідки воєнних дій для даної території мають комплексний та довготривалий

характер. Поряд із критичними втратами в агросекторі суттєвих ушкоджень зазнали інфраструктура, житловий фонд і природні комплекси, що загалом стримує швидке відновлення громади. Тому важливо провести детальний просторовий аналіз, який дозволяє об'єктивно оцінити ступінь трансформацій території, визначити пріоритетні ділянки для відновлення та розробити обґрунтовані рішення щодо подальшого розвитку. Досягнення таких цілей прямо залежить від застосування сучасних технологій збору, обробки й інтерпретації геоданих.

2.2. Загальний огляд ГІС-програм, ДЗЗ-платформ та матеріалів дослідження

Сучасні геоінформаційні дослідження спираються на використання програмних рішень, що забезпечують інтеграцію, опрацювання, аналітику та візуальне подання великих масивів просторової інформації. ГІС та платформи ДЗЗ дають змогу комплексно поєднувати різноманітні джерела даних такі, як супутникові зображення, картографічні матеріали, результати польових спостережень, цифрові моделі рельєфу для формування всебічного уявлення про стан та зміни природних і антропогенних ландшафтів. Особлива актуальність таких інструментів зростає в умовах аналізу наслідків воєнних дій, коли необхідні оперативність, широке територіальне покриття та здатність працювати з багаточасовими наборами даних.

Google Earth Engine (GEE) є хмарною геоінформаційною платформою, розробленою компанією Google для аналізу супутникових та інших геопросторових даних у глобальних масштабах. Основою роботи GEE є серверна обробка, яка дозволяє працювати з петабайтними архівами (1 петабайт дорівнює 1000 терабайтам) даних ДЗЗ без завантаження їх на локальний комп'ютер (рис.2.4). Платформа поєднує в собі вбудовані інструменти для обробки

растрових і векторних наборів та спеціалізоване середовище програмування, доступне через Code Editor або Python API.

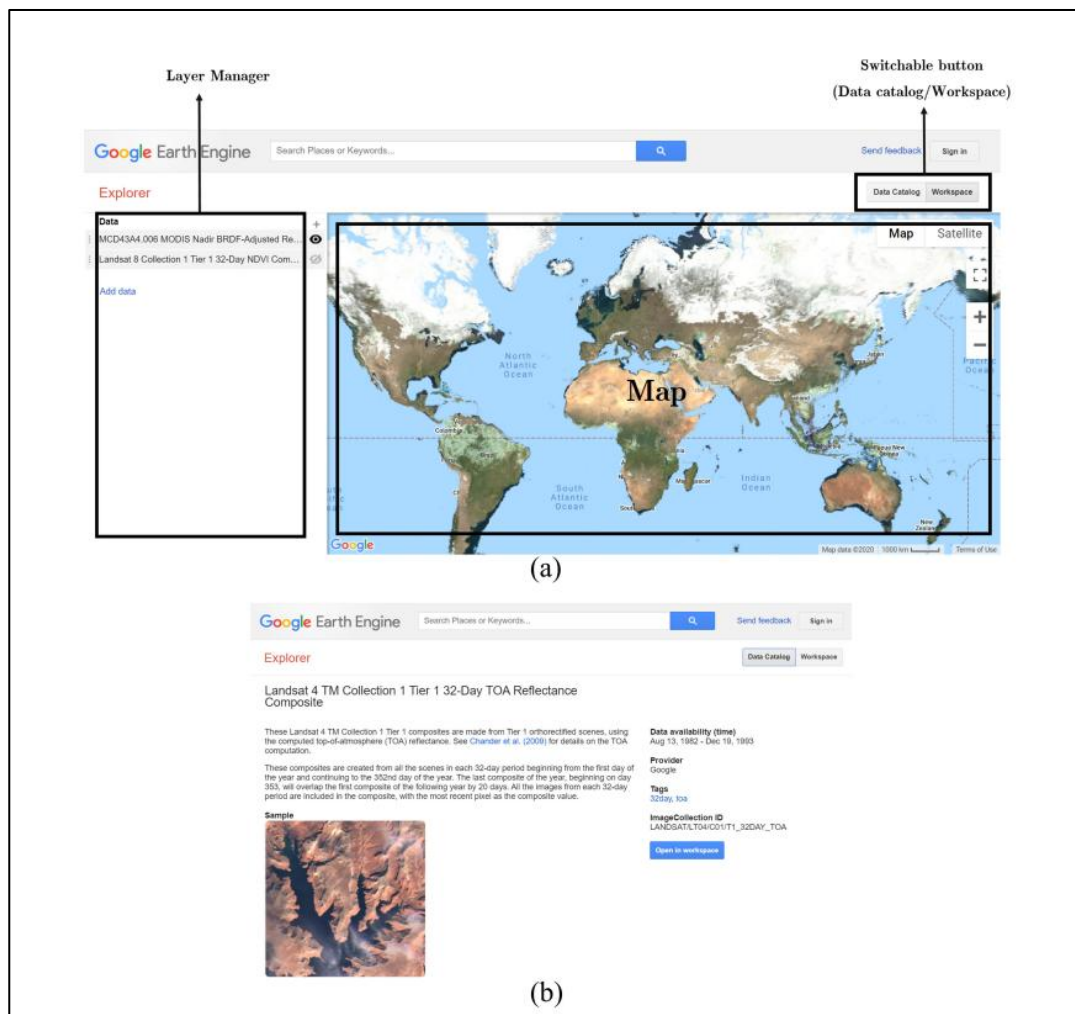


Рис.2.4. Платформа GEE: (a) Workspace, (b) Data Catalog [58]

Центральним елементом середовища є «ImageCollection» - логічна структура, що містить множину зображень, які можна фільтрувати, обробляти та аналізувати за допомогою вбудованих функцій.

За своєю архітектурою GEE складається з трьох ключових складових:

- каталогу даних;
- інтерфейсу для перегляду та візуалізації;
- повнофункціонального редактора коду.

Така структура робить платформу універсальним інструментом як для початківців, так і для досвідчених науковців.

Однією з фундаментальних особливостей GEE є відкритий доступ до великої кількості глобальних даних: багаторічних серій Landsat, Sentinel-1 і Sentinel-2, MODIS, метеорологічних, кліматичних та геофізичних наборів. Усі ці дані автоматично оновлюються, проходять стандартизовану попередню обробку та доступні для миттєвої аналітики. Саме GEE сьогодні є одним із наймасштабніших сховищ відкритих супутникових даних у світі. Користувач може працювати з багаточасовими композитами, будувати часові ряди, створювати карти змін та здійснювати просторовий аналіз на територіях будь-якого розміру - від локальних ділянок до континентів [59].

Ключовою перевагою GEE є виконання всіх розрахунків на серверній стороні, що унеможливорює перевантаження локальних ресурсів користувача. Вбудовані алгоритми підтримують спектральні індекси, фільтрацію, сегментацію, класифікацію та аналіз часових рядів. Платформа широко застосовується для моніторингу земного покриття, лісових пожеж, деградації рослинності та змін у сільськогосподарських екосистемах. GEE забезпечує можливість створювати власні алгоритми машинного навчання для класифікації територій, використовуючи як традиційні методи, так і нейронні мережі. Візуалізаційні можливості дозволяють у режимі реального часу будувати карти, гістограми, графіки та інтерпретувати результати.

Важливою рисою GEE є інтеграція з глобальними «Big Data» геопросторовими наборами, що відкриває можливості аналізу багатомільйонних піксельних вибірок за секунди. Користувачі можуть застосовувати операції над кожним пікселем, обчислювати статистики, будувати просторові моделі та масштабувати аналіз на великі території. Платформа також підтримує georeferenced vector data, що дає змогу використовувати межі полігонів, ліній та точок для вибірок та аналітики. Завдяки механізму «Reducer» можливе агрегування значень у межах територій, що корисно для аналізу районів, полів або адміністративних одиниць [60].

Google Earth Engine є універсальною платформою для обробки супутникових даних, тому її застосування охоплює широкий спектр наукових, прикладних та аналітичних сфер (табл 2.1).

Таблиця 2.1

Напрямки використання Google Earth Engine

(укладено автором за даними [58, 61])

Напрямок дослідження ландшафтів	Основні можливості та завдання
1. Вегетаційний та аграрний моніторинг	Оцінка стану рослинності; визначення деградованих, перелогових і необроблюваних ділянок; аналіз сезонної та міжрічної динаміки рослинного покриву; прогнозування продуктивності агроландшафтів.
2. Аналіз ґрунтово-земельних трансформацій	Виявлення оголених ґрунтів, ерозійних процесів, порушених поверхонь і техногенних змін; оцінка структури мікрошорсткості за даними SAR; картографування зон деградації ґрунтів.
3. Моніторинг водних ландшафтів	Визначення змін площі та стану водойм; виявлення заболочування, замулення або забруднення; аналіз динаміки заплавних ландшафтів і гідрологічного режиму.
4. Лісові та природні ландшафти	Оцінка площ рубок, пожеж, сухостою; аналіз структурних змін лісового покриву; моніторинг фрагментації природних урочищ, зміни меж екосистем.
5. Виявлення та оцінка наслідків воєнних дій	Фіксація вирв, окопів, технічних доріг і позицій; виявлення спалених або зруйнованих ділянок; аналіз порушених агро- і природних фацій; оцінка масштабів техногенного впливу.
6. Просторово-структурний аналіз ландшафтів	Побудова багаточасових композитів і карт змін; визначення меж урочищ та фацій; моделювання ландшафтної мозаїки; аналіз трансформацій структури землекористування.

7. Урбаністичні та інфраструктурні зміни	Оцінка щільності забудови, виявлення нових інфраструктурних об'єктів; аналіз змін дорожньої мережі та промислових територій; моніторинг техногенного навантаження.
---	--

GEE підтримує широкі можливості експорту даних, що дозволяє інтегрувати результати аналізу у зовнішні ГІС-середовища та інші програмні платформи. Експорт у формати GeoTIFF забезпечує передачу растрових результатів з високою точністю, збереженням метаданих, проєкції та багатоканальної структури зображень. Формат Shapefile дозволяє вивантажувати векторні дані, зокрема межі аналізованих територій, результати класифікацій, зональні статистики або контури виявлених об'єктів. Також доступний експорт у табличні формати (CSV), що є корисним для передачі результатів статистичного аналізу, часових рядів або зональних розрахунків до середовищ R, Python чи Excel.

Для контролю якості результатів GEE використовує інструменти репроекції, ресемплінгу та фільтрації даних [60]:

- репроекція (reprojection) дозволяє узгодити географічні координатні системи різних джерел, забезпечуючи коректність геометричного накладання;
- ресемплінг (resampling) застосовується для зміни просторової роздільної здатності зображень, що важливо при поєднанні даних різних супутникових місій або підготовці композитів;
- фільтрація (filtering) допомагає видаляти хмарність, шум, артефакти та некоректні пікселі, що суттєво підвищує якість вихідних продуктів.

Центральним робочим середовищем платформи є текстовий редактор «Code Editor», який забезпечує повноцінну розробку, організацію та зберігання скриптів у хмарі. «Code Editor» містить інтерактивний перегляд карти, консоль, менеджер шарів, доступ до довідкової документації API та вбудовану Git-

подібну систему для зберігання версій (рис.2.5). Це дозволяє підтримувати складні проекти, зберігати різні версії алгоритмів, ділитися ними та формувати власні бібліотеки функцій.

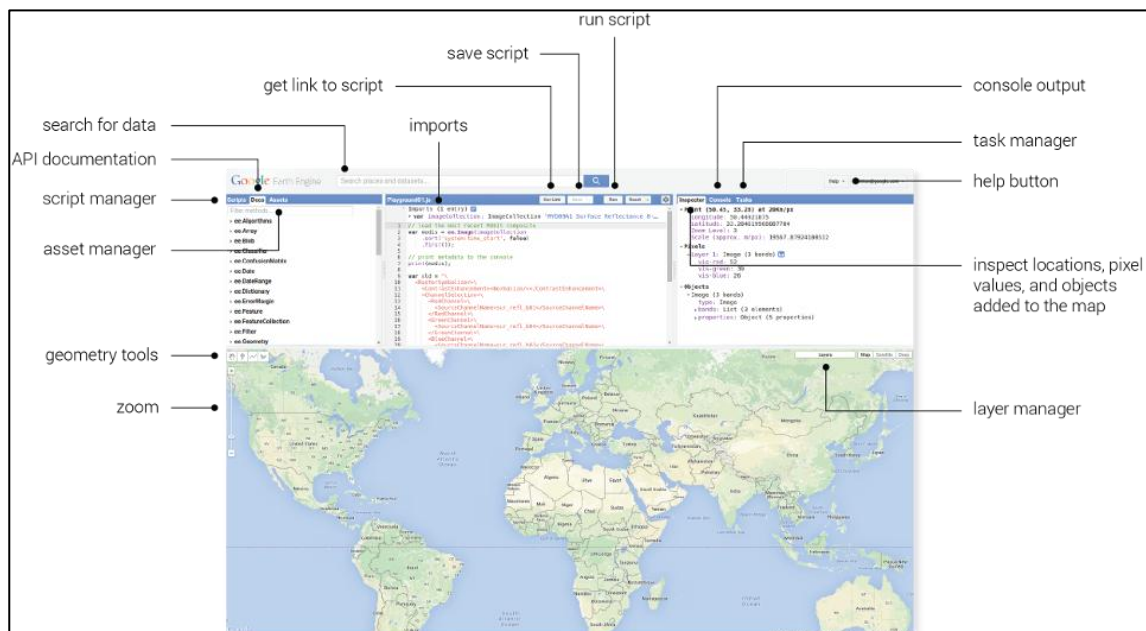


Рис.2.5. Елементи Code Editor [33]

Завдяки інтеграції з Google Drive користувачі можуть швидко експортувати фінальні результати, зберігати великі GeoTIFF-файли, таблиці або векторні дані у власному хмарному сховищі. Завдяки цьому робочий процес стає максимально безпечним та зручним, оскільки дані не потребують ручного завантаження з GEE-серверів.

Важливим елементом платформи є механізм «Tasks», що відповідає за управління обчислювальними процесами. У цьому модулі відображаються всі активні, завершені або чергові завдання, такі як експорт растрових шарів, створення композитів або масивні обчислювальні операції. Користувач може контролювати пріоритет завдань, відстежувати їх прогрес, переглядати повідомлення про помилки, повторно запускати невдалі обчислення або зупиняти процеси за потреби. Це особливо важливо під час роботи з великими наборами даних, де обчислення можуть тривати тривалий час і потребують моніторингу.

Таким чином, можливості Google Earth Engine демонструють, наскільки ефективними можуть бути хмарні геоінформаційні сервіси для роботи з великими масивами супутникових даних, автоматизованих обчислень та моніторингу просторових процесів.

Саме для детальної аналітики на локальному рівні, створення високоточних картографічних продуктів, проведення глибокого просторового моделювання та інтеграції різнорідних джерел геоданих використовуються ГІС-платформи. Однією з найпоширеніших і найбільш технологічно розвинених систем цього типу є ArcGIS Pro.

ArcGIS Pro є сучасною геоінформаційною системою, розробленою компанією Esri, призначеною для комплексної роботи з векторними, растровими та тривимірними геопросторовими даними. Однією з ключових характеристик ArcGIS Pro є її інтеграція з ArcGIS Online та ArcGIS Enterprise, що забезпечує хмарний доступ до даних, спільної роботи та публікації геопросторових сервісів [52].

Принцип роботи програми ґрунтується на (рис.2.6):

- використанні структури «проекту» (Project), у межах якого є доступ до параметрів програм та властивостей (1);
- використанні компонент «Стрічка» упорядковує команди, розміщуючи їх на окремих вкладках (2);
- застосуванні вікна «Пошук команд» яке забезпечує зручний пошук і відкриття інструментів геообробки, дозволяє запускати різні команди інтерфейсу користувача. Додатково надає швидкий доступ до відповідних довідкових розділів на основі введеного тексту (3);
- функціонуванні панелі «Зміст» що показує елементи, які відповідають активному типу вмісту, яким може бути карта, сцена, макет або каталог (4);

- використанні основних робочих середовищ, таких як карта, сцена чи таблиця, які забезпечують взаємодію з просторовою та атрибутивною інформацією (5);
- роботі панелі «Каталог» яка є основним засобом для організації та управління елементами проєкту (6).

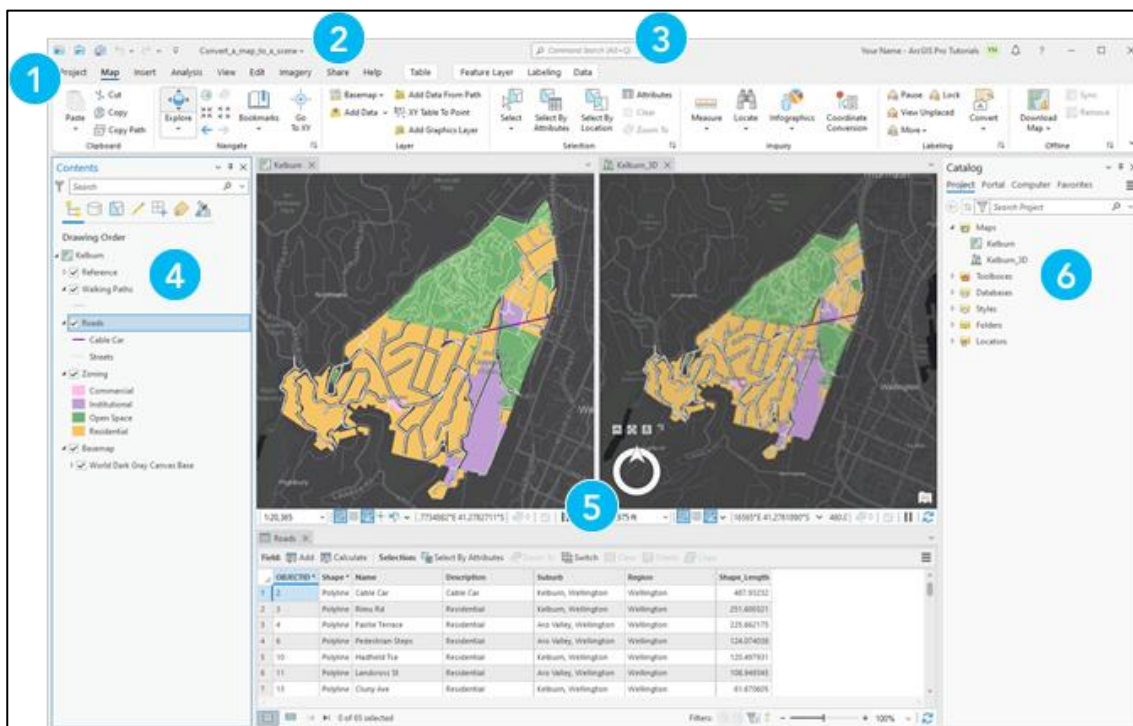


Рис.2.6. Інтерфейс ArcGIS Pro [22]

ArcGIS Pro підтримує багатопланову концепцію представлення геоданих, дозволяючи комбінувати численні набори інформації для отримання комплексних картографічних моделей.

ArcGIS Pro містить розширений набір аналітичних інструментів, організованих у модулі «Geoprocessing», який включає сотні геометричних, статистичних, просторових, гідрологічних та растрових операцій. Ці інструменти працюють за принципом ланцюгової обробки, що дозволяє створювати власні моделі аналізу у середовищі ModelBuilder або автоматизувати процеси за допомогою мови Python через бібліотеку ArcPy. Програма має широкі можливості редагування векторної геометрії, забезпечуючи точне створення та

корекцію об'єктів, підтримку топологічних правил, перевірку помилок і керування версіями.

ArcGIS Pro дозволяє виконувати широкий спектр завдань (рис.2.7), в тому числі, ті які можна використати для аналізу змін ландшафтів, спричинених воєнними діями. Багаточасові супутникові дані дають змогу виявляти динаміку руйнувань, порівнюючи стан території до та після бойових подій. Інструменти просторового аналізу - визначати ділянки з порушеним рельєфом, деградованими ґрунтами, пошкодженими агроландшафтами та елементами інженерних укріплень. Класифікаційні та сегментаційні алгоритми забезпечують автоматизоване виділення зон вирв, окопів, пожеж або техногенно трансформованих поверхонь. Крім того, ArcGIS Pro дозволяє інтегрувати польові дані, результати дистанційного зондування та статистичні моделі для формування комплексної оцінки масштабів і просторової структури воєнних порушень ландшафтів.

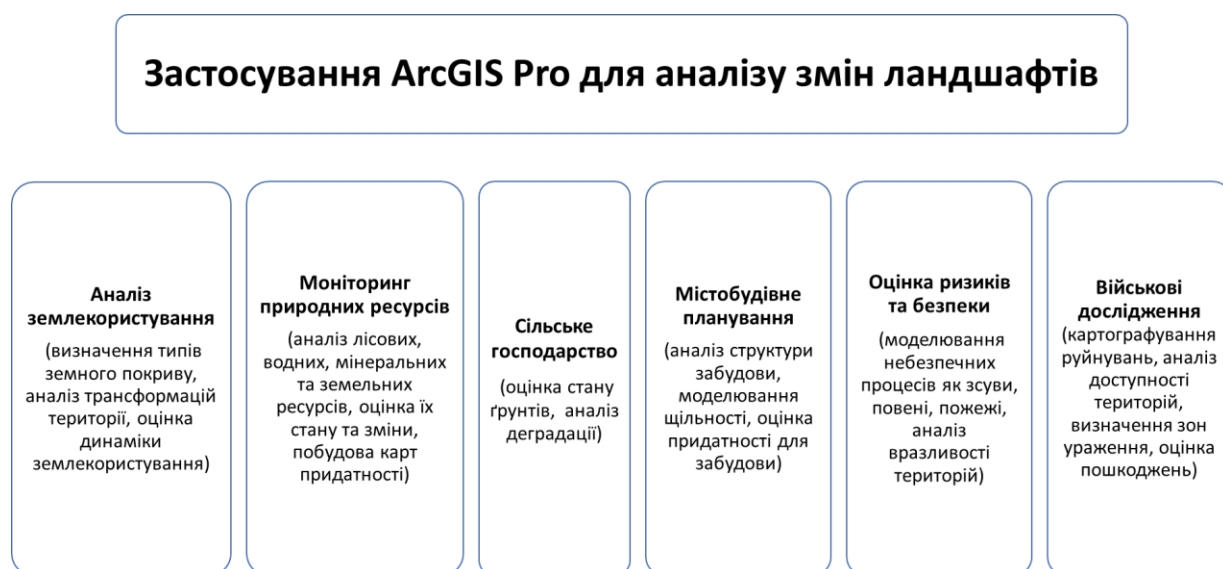


Рис.2.7. Застосування *ArcGIS Pro* для аналізу змін ландшафтів (укладено автором)

Завдяки своїм інструментальним можливостям ArcGIS Pro виступає універсальною платформою. Система поєднує функціонал класичних ГІС, як редагування геометрії, аналіз рельєфу, статистичні операції, просторове

накладання, разом із сучасними хмарними сервісами, розширеною 3D-аналітикою, машинним навчанням та інтеграцією з онлайн-геопорталами. Така комбінація забезпечує точність, гнучкість і ефективність у роботі з геопросторовою інформацією.

Основним джерелом супутникових даних у дослідженні обрано знімки супутникової системи Sentinel-2, яка входить до програми Copernicus Європейського космічного агентства (ESA) та призначена для спостережень земної поверхні.

Супутникова система складається з двох ідентичних апаратів: Sentinel-2A і Sentinel-2B, що працюють на сонячно-синхронній орбіті та забезпечують високу повторюваність зйомки: кожні 5 днів на екваторі та частіше на середніх широтах, що є особливо важливим для моніторингу динамічних процесів. Sentinel-2 забезпечує отримання знімків у 13 спектральних каналах у видимому, ближньому та короткохвильовому інфрачервоних діапазонах з просторовою роздільною здатністю 10, 20 та 60 метрів, залежно від спектрального каналу (рис.2.8) [73].

Sentinel-2 Bands	Central Wavelength (μm)	Resolution (m)
Band 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 - Blue	0.490	10
Band 3 - Green	0.560	10
Band 4 - Red	0.665	10
Band 5 - Vegetation Red Edge	0.705	20
Band 6 - Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7 - Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 - NIR	0.842	10
Band 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Band 9 - Water vapour	0.945	60
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60
Band 11 - SWIR	1.610	20
Band 12 - SWIR	2.190	20

Рис.2.8. Характеристики каналів *Sentinel-2* [73]

Особливу цінність Sentinel-2 становить для географічних та екологічних досліджень завдяки оптимальному поєднанню просторової, часової та спектральної роздільності. Канали у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах (з просторовою роздільною здатністю 10 м) забезпечують високу деталізацію рослинного покриву, що дозволяє ефективно обчислювати вегетаційні індекси, зокрема NDVI, GNDVI, EVI (Enhanced Vegetation Index) для аналізу стану рослинності, оцінки деградації земель та ідентифікації пошкоджень унаслідок воєнних дій. Канали SWIR (з просторовою роздільною здатністю 20 м) є надзвичайно важливими для визначення водно-фізичних властивостей ґрунтів, виявлення вигорілих ділянок, визначення теплових та структурних аномалій. Канали з роздільністю 60 м підтримують атмосферну корекцію та маскування хмар, що покращує якість попередньої обробки [74].

Завдяки систематичному оновленню архіву Sentinel-2 та відкритому доступу до даних через різні платформи, у т.ч. GEE, ці знімки є надійною основою для моніторингу великих територій. Висока частота повторних зйомок дозволяє працювати з багаточасовими серіями, аналізувати зміни у динаміці та виконувати ретроспективні оцінки ландшафтів у період воєнних дій та період післявоєнного відновлення [75]. Наявність узгоджених радіометричних і геометричних характеристик робить Sentinel-2 одним з найстабільніших джерел для побудови композитів, картографічних моделей та алгоритмів класифікації.

2.3. Визначення й обґрунтування оптимальних порогових значень індексів (NDVI, BSI) для виявлення змін ландшафтів

Використання спектральних індексів є одним із ключових підходів для кількісної оцінки стану земельних ресурсів і виявлення деградаційних процесів у ландшафтах. Серед сучасних методів аналізу, що забезпечують ефективне оцінювання стану сільськогосподарських ландшафтів, належать NDVI та BSI. Обидва індекси розроблені для автоматизованого виділення різних типів

поверхні, ґрунтуючись на фізично обґрунтованій взаємодії рослинності, ґрунтів і поверхневих матеріалів зі спектральними діапазонами супутникових сенсорів.

NDVI - це нормалізований спектральний індекс, який використовується для оцінювання стану та динаміки рослинної біомаси протягом вегетаційного періоду. Його значення визначаються на основі різниці та суми відбиття електромагнітного випромінювання у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах:

$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$, де NIR – це значення відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні, а RED - відбиття в червоному діапазоні [10,4].

Показник індексу змінюються в межах від -1 до 1, де високі значення відповідають здоровій рослинності, а низькі - оголеному ґрунту, деградації або техногенним ділянкам. На практиці для виявлення порушень важливим є встановлення оптимальних порогових значень, які відокремлюють ділянки з різним рівнем деградації або зміни покриття (табл 2.2).

Таблиця 2.2

Оптимальні діапазони NDVI для оцінювання стану територій

(укладено автором за даними [4])

NDVI	Стан рослинності
< 0	Відсутність рослинності або штучні поверхні: водойми, асфальт, бетон, металеві конструкції
< 0.15	Відкритий ґрунт або свіжа деструкція як вирви, траншеї, техногенні поверхні, території після пожеж, порушення внаслідок вибухів
0.15-0.3	Слабка рослинність, початкові ознаки деградації. Тривало необроблювані поля, ділянки з порушеною біомасою
0.3–0.5	Середня або фрагментована рослинність. Перехідні фази розвитку культур, молоді посіви, частково пошкоджені поля

> 0.5–1	Щільна, непорушена та активна рослинність. Стабільні агроландшафти, природні лісові масиви, інтенсивно вегетуючі рослини
---------	---

Існує широкий спектр застосувань цього індексу для аналізу стану та динаміки рослинного покриву [41]:

- виявлення необроблюваних полів (стабільно низькі значення NDVI протягом кількох сезонів, характерні для територій, покинутих через воєнні дії чи мінування);
- оцінювання слідів від техніки або траншей (локальні лінійні зниження NDVI, що відображають порушення ґрунтового та рослинного покриву важкою технікою чи зведенням фортифікаційних укріплень);
- діагностика вибухових впливів (різкі точкові провали NDVI у місцях формування вирв та зон радіального пошкодження біомаси);
- виявлення пожеж (значне зменшення NDVI залежно від ступеня та інтенсивності вигорання рослинного покриву);
- моніторинг стану рослинності після бойових дій.

Основні переваги NDVI полягають у тому, що він:

- забезпечує кількісне оцінювання біомаси, дозволяючи об'єктивно характеризувати рівень розвитку та продуктивність рослинного покриву;
- ефективно застосовується на великих територіях;
- не залежить від конкретного типу супутникового сенсора, що забезпечує можливість використання даних різних місій, зокрема Landsat, Sentinel-2 та MODIS;
- дає змогу формувати узгоджені у просторі та часі ряди даних, необхідні для аналізу довгострокових тенденцій і змін ландшафтів;
- є придатним для автоматизованої класифікації та картографування, що значно спрощує створення тематичних карт стану рослинності та динаміки її змін.

Індекс BSI призначений для виділення відкритих ґрунтів, поверхонь зі зниженою рослинністю та ділянок із техногенними або природними порушеннями. BSI спрямований на аналіз відбиття ґрунтової поверхні, що робить його ефективним для картографування деградаційних процесів, оцінювання стану агроландшафтів та ідентифікації зон деструкції внаслідок техногенної або воєнної діяльності.

BSI є нормалізованим індексом, який поєднує спектральну інформацію з видимого та інфрачервоного діапазонів. Він розраховується на основі значень відбиття в синьому (BLUE), червоному (RED), ближньому інфрачервоному (NIR) та короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) каналах [20]:

$$BSI = ((SWIR1 + RED) - (NIR + BLUE)) / (SWIR1 + RED + (NIR + BLUE)).$$

Така комбінація забезпечує інформативність щодо стану ґрунтової поверхні, оскільки оголений ґрунт характеризується підвищеною відбивною здатністю в червоному та SWIR-діапазоні та нижчими значеннями в NIR і BLUE.

Для виявлення змін у ландшафтній структурі застосовуються орієнтовні порогові значення BSI, що описують різні типи поверхонь (табл.2.3).

Таблиця 2.3.

Інтерпретація значень BSI

(укладено автором за даними [47])

BSI	Стан рослинності
< 0	Густа рослинність, водні поверхні
0 – 0.2	Частково вкритий рослинністю ґрунт, перехідні стани
0.2 – 0.4	Відкритий або сухий ґрунт, обмежена вегетація
0.4 – 1.0	Сильна деградація ґрунту, техногенні поверхні, зони впливу вибухів, траншеї

Індекс BSI широко застосовується у різних напрямках аналізу природних та антропогенних процесів:

- індекс реагує на підвищену яскравість ґрунту, дозволяючи визначити площі з мінімальною біомасою, що є характерним для деградованих ландшафтів або територій після сезонного зниження рослинності;
- зростання BSI свідчить про зменшення рослинного покриву, що може бути наслідком ерозії, виснаження ґрунту, тривалої відсутності обробітку або залишення земель через зовнішні впливи;
- після вигорання рослинності ґрунт втрачає біомасу й органічний шар, тому індекс дозволяє окреслювати межі вигорілих територій та оцінювати інтенсивність порушень;
- порівняння значень BSI між двома періодами дозволяє виявити нові порушення, оцінити масштаби техногенного втручання та простежити відновлення ґрунтової поверхні.

Застосування BSI у моніторингу має низку суттєвих переваг:

- висока чутливість до оголених ґрунтів, що забезпечує ефективність у районах із мінімальною вегетацією;
- менша залежність від сезонних змін рослинності, що робить BSI стабільнішим показником у міжсезонний період;
- ефективність у задачах моніторингу деградації ґрунтів;
- придатність для автоматизованих методів класифікації, що дозволяє проводити масштабні територіальні оцінки;
- сумісність із іншими індексами, зокрема NDVI, що забезпечує комплексну характеристику ландшафтних процесів [47].

У даному дослідженні було використано оптичні супутникові дані Sentinel-2, незважаючи на їх високу інформативність, суттєво реагують на зміни атмосферних умов, сезонність вегетації та спектральні характеристики ґрунтово-рослинного покриву. Це означає, що універсальних порогів значень індексів рослинності та відкритого ґрунту не існує, а їх застосування потребує адаптації до конкретної ландшафтної обстановки. Особливо це важливо для територій, що зазнали воєнних впливів, де спектральна сигнатура поверхні сильно змінюється

внаслідок деградації рослинності, перемішування горизонтів ґрунту вибухами, пожежами чи рухом важкої техніки.

З огляду на це було проведено практичну верифікацію індексів NDVI та BSI, яка дозволила встановити оптимальні діапазони їх значень саме для умов Балаклійської територіальної громади. Верифікація полягала у тестуванні алгоритму на компактній ділянці, використовуючи лише один супутниковий знімок Sentinel-2 за конкретну дату - 04.04.2025. Такий підхід дає змогу мінімізувати вплив сезонної мінливості та оцінити коректність обраних порогів індексів на реальних об'єктах.

У межах тестової ділянки було здійснено аналіз спектральних характеристик агроландшафтів з різним режимом використання - відкритого ґрунту, слабо зарослих поверхонь, перелогів, а також орних земель. Це дозволило визначити спектральні діапазони, характерні для поверхонь зі зниженою щільністю рослинного покриву (рис.2.9). Зокрема, значення NDVI 0.15–0.25 є типовими для відкритих або слабо зарослих ділянок на початку вегетації. У нормальних умовах такі показники відповідають сезонній фазі розвитку агроландшафтів. Водночас стійка присутність цього діапазону поза характерним періодом, особливо у поєднанні з різким спадом NDVI у часовому ряді, може вказувати на порушення функціонування агроландшафту, зумовлене наслідками воєнних дій. На основі цього аналізу були визначені такі оптимальні діапазони індексів:

- NDVI: 0.15 - 0.25. Значення, характерні для поверхонь із низькою або початковою вегетацією. У ранньовесняний період такі показники чітко розмежовують орні землі, що не увійшли у фазу активного росту, від ділянок з вищою інтенсивністю біомаси.
- BSI: 0.35 - 1.00. Цей інтервал відповідає ділянкам з відкритим або оголеним ґрунтом, техногенним порушенням поверхні, слідами важкої техніки, а також перелогам та зруйнованим агроландшафтам.

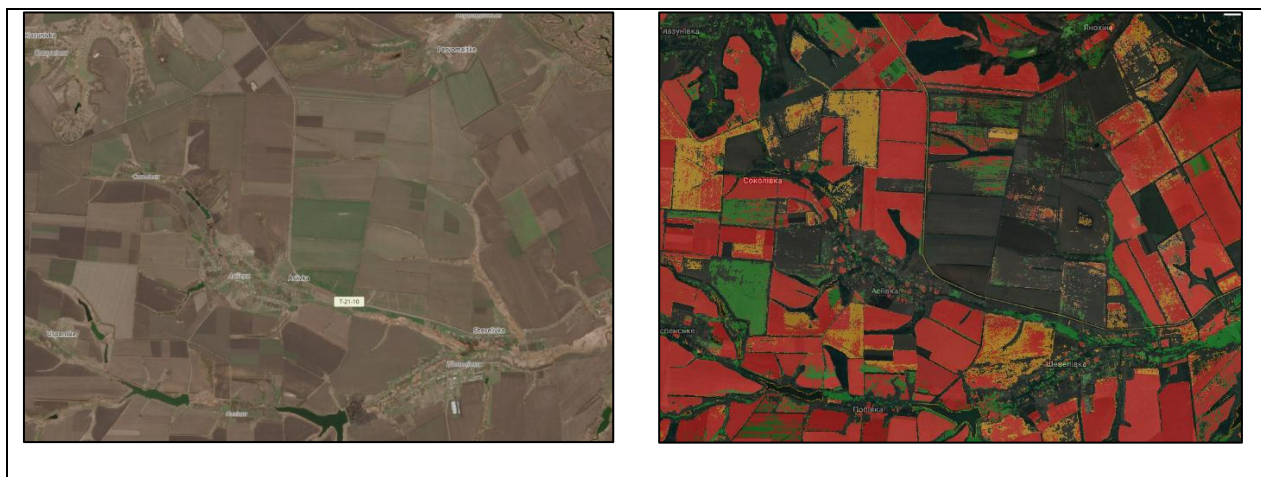


Рис.2.9. Порівняння виконаної класифікації з RGB зображенням

На основі цих порогів було сформовано класифіковане зображення, де кожний тип поверхні має свій колір:

- зелений - пікселі, що потрапили у заданий діапазон NDVI (0.15–0.25). Це ділянки з низькою рослинністю або початковою фазою росту;
- оранжевий - пікселі, що відповідають діапазону BSI (0.35–1.00). Характерні для відкритого ґрунту, пересушених ділянок, техногенних зон та полів без вегетації;
- червоний - пікселі, де одночасно виконуються умови для NDVI і BSI. Це найбільш інформативний клас, який свідчить про відкриті поверхні, тобто ділянки, де майже гарантовано відсутня активна рослинність і присутній відкритий/порушений ґрунт.

Дана візуальна класифікація дозволяє дуже швидко оцінити просторове розташування оброблених земель і підтверджує правильність підібраних індексних порогів.

Таким чином, у результаті перевірки алгоритм чітко ідентифікував оброблені поля з відкритим ґрунтом, а також локальні ділянки зі слабкою рослинністю, що є особливо важливим для подальшого аналізу змін, виявлення стабільних деградаційних зон та всіх етапів просторового моніторингу воєнних впливів.

2.4. Методика обробки даних для оцінки впливу воєнних дій на досліджувану територію в середовищі Google Earth Engine

Дане дослідження спрямоване на оцінку впливу воєнних дій на агроландшафти в межах Балаклійської територіальної громади шляхом кількісного визначення площі порушених і стабільно функціонуючих ландшафтів. Методологічною основою є аналіз часових рядів супутникових знімків, який дозволяє виявляти аномалії та зміни в природному циклі використання агроландшафтів з подальшим ручним доаналізом непокритих територій.

Для реалізації цього завдання була обрана хмарна геопросторова платформа Google Earth Engine, яка забезпечує зручний доступ та високу обчислювальну потужність для паралельної обробки великих обсягів геопросторових даних (рис.2.10). Основним джерелом інформації слугують мультиспектральні знімки супутника Sentinel-2 з колекції COPENICUS/S2_SR_HARMONIZED, які надають просторову роздільну здатність 10 та 20 метрів та необхідну спектральну інформацію для розрізнення різних типів поверхні.

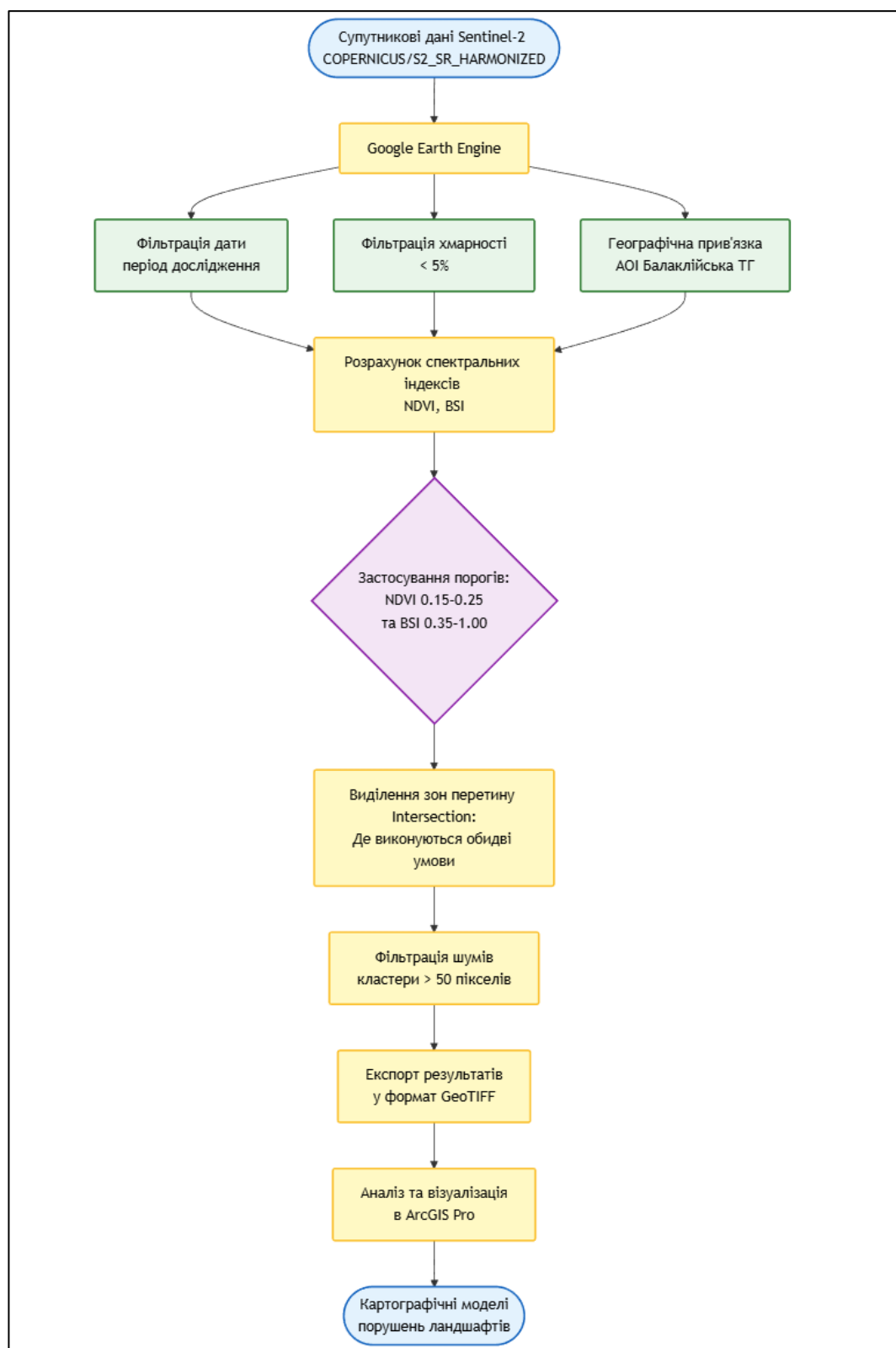


Рис.2.10. Схема - алгоритм методики дослідження (укладено автором)

З метою виявлення агроландшафтів, які зазнали деградації внаслідок воєнних дій, у роботі здійснюється моніторинг ділянок на предмет наявності

ознак, які вказують на відсутність активної рослинності та тривалу присутність відкритого (голого) ґрунту протягом вегетаційного періоду. Хоча відкритий ґрунт є типовим результатом переорювання та підготовки землі до посіву (що свідчить про оброблюваність), його тривала фіксація в пікові місяці вегетації свідчить про занедбаність території.

Для об'єктивної та автоматизованої ідентифікації цих станів використовується комбінація двох спектральних індексів: нормалізований різницевий індекс рослинності (NDVI) та індекс відкритого ґрунту (BSI).

Щоб забезпечити високу достовірність ідентифікації необроблюваних земель реєструються лише ті території, на яких протягом визначеного аграрного сезону фіксуються одночасно потрібні значення обох індексів (низький NDVI та високий BSI), що формує надійний класифікаційний критерій. Додаткова темпоральна перевірка критично важлива і здійснюється шляхом порівняння двох аналогічних часових проміжків різних років (наприклад, 2024 та 2025). Це дозволяє виявити стійкі аномалії у сільськогосподарському циклі, відфільтровуючи тимчасові явища, пов'язані з ротацією культур чи погодними умовами, і акцентувати увагу на ділянках, які стабільно демонструють ознаки відсутності втручання людини в стан агротериторій, що безпосередньо пов'язано з наслідками воєнних дій, такими як мінне забруднення та залишки боєприпасів.

Головним інструментом дослідження виступає код-класифікатор адаптований для використання в GEE (рис.2.11).

```

// Define AOI
var AOI = geometry;
Map.centerObject(AOI, 11);

// ---- Time ranges ----
var startDate_A = '2024-03-30';
var endDate_A = '2024-09-20';

var startDate_B = '2025-03-30';
var endDate_B = '2025-09-20';

// ---- Helper function to process a time range ----
function processPeriod(startDate, endDate, AOI) {
  var S2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")
    .filterDate(startDate, endDate)
    .filterBounds(AOI)
    .filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'less_than', 5);

  // Add NDVI + BSI
  var S2_with_indices = S2.map(function(image) {
    var ndvi = image.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('ndvi');
    var bsi = image.expression(
      '(((B11 + B4) - (B8 + B2)) / ((B11 + B4) + (B8 + B2)))',
      {
        'B11': image.select('B11'),
        'B4': image.select('B4'),
        'B8': image.select('B8'),
        'B2': image.select('B2')
      })
      .rename('bsi');
    return image.addBands(ndvi).addBands(bsi);
  });

  // NDVI mask: [0.15, 0.2]
  var ndviMask = S2_with_indices.map(function(image) {
    return image.select('ndvi').gt(0.15).and(image.select('ndvi').lt(0.25)).rename('ndvi_inRange');
  }).max();

  // BSI mask: [0.15, 0.2]
  var bsiMask = S2_with_indices.map(function(image) {
    return image.select('bsi').gt(0.32).and(image.select('bsi').lt(1)).rename('bsi_inRange');
  }).max();

  // Classification
  // 0 = none, 1 = NDVI only, 2 = BSI only, 3 = both
  var classified = ndviMask.add(bsiMask.multiply(2)).clip(AOI);

  return classified;
}

// ---- Run for both periods ----
var classified_A = processPeriod(startDate_A, endDate_A, AOI);
var classified_B = processPeriod(startDate_B, endDate_B, AOI);

// ---- Intersection: pixels that are "both NDVI+BSI" in both periods ----
var intersectBoth = classified_A.eq(3).and(classified_B.eq(3)).selfMask(); // Keep only pixels with value 1

// ---- Label connected clusters (8-connected) ----
var connected = intersectBoth.connectedComponents(ee.Kernel.plus(1), 1024);

// ---- Add a constant band to count pixels per cluster ----
var ones = ee.Image(1).updateMask(intersectBoth);

// ---- Count pixels in each cluster ----
var clusterSizes = ones.addBands(connected.select('labels'))
  .reduceConnectedComponents({
    reducer: ee.Reducer.count(),
    labelBand: 'labels'
  }).rename('cluster_size');

// ---- Define large and small clusters ----
var largeClusters = clusterSizes.gt(50).selfMask(); // > 50 pixels
var smallClusters = clusterSizes.lte(50).selfMask(); // ≤ 50 pixels

// ---- Visualization ----
var visParams = {
  min: 0,
  max: 3,
  palette: ['black', 'green', 'orange', 'red']
  // black = none, green = NDVI only, orange = BSI only, red = both
};

Map.addLayer(classified_A, visParams, 'Period A (NDVI+BSI)');
Map.addLayer(classified_B, visParams, 'Period B (NDVI+BSI)');
Map.addLayer(largeClusters, {palette: ['blue']}, 'Large Intersection Clusters (>50px)');
Map.addLayer(smallClusters, {palette: ['purple']}, 'Small Intersection Clusters (≤50px)');

// ---- Export ----
Export.image.toDrive({
  image: classified_A,
  description: 'Classified_AOI_PeriodA',
  region: AOI,
  scale: 10,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

Export.image.toDrive({
  image: classified_B,
  description: 'Classified_AOI_PeriodB',
  region: AOI,
  scale: 10,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

Export.image.toDrive({
  image: largeClusters,
  description: 'largeClusters',
  region: AOI,
  scale: 10,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

Export.image.toDrive({
  image: smallClusters,
  description: 'smallClusters',
  region: AOI,
  scale: 10,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

```

Рис.2.11. Код-класифікатор [71]

Кожна частина коду має своє призначення. Першим етапом у побудові аналітичного середовища в GEE є визначення території дослідження (Area of Interest, AOI) та встановлення масштабу відображення (рис.2.12).

```
// Define AOI
var AOI = geometry;
Map.centerObject(AOI, 11);
```

Рис.2.12. Частина коду, яка відповідає за визначення території

У коді це реалізується через змінну AOI, яку задають як полігон або мультиполігон за допомогою інструментів графічного редагування в інтерфейсі GEE. Команда Map.centerObject (AOI, 11) автоматично орієнтує карту на вибрану територію та встановлює оптимальний рівень наближення (масштаб 11), що дозволяє одразу перейти до аналізу цільової ділянки. Визначення AOI є ключовим, оскільки всі подальші операції, зокрема фільтрація супутникових знімків, обмеження просторових вибірок або розрахунок індексів, виконуються саме в межах цієї області. Крім того, початкове центрування карти створює зручне робоче середовище, забезпечуючи візуальний контроль над досліджуваною територією на всіх етапах аналізу [35].

Другим елементом структури сценарію є задання часових інтервалів, у межах яких здійснюється порівняльний аналіз супутникових даних (рис.2.13).

```
// ---- Time ranges ----
var startDate_A = '2024-03-30';
var endDate_A   = '2024-09-20';

var startDate_B = '2025-03-30';
var endDate_B   = '2025-09-20';
```

Рис.2.13. Частина коду, яка відповідає за визначення часових інтервалів

У коді визначено два окремі періоди: Period A (30 березня - 20 вересня 2024 року) та Period B (30 березня - 20 вересня 2025 року), що відповідають весняно-літнім сезонам двох різних років. Таке хронологічне розмежування дає змогу

проводити міжрічне порівняння стану земної поверхні, оцінювати зміни землекористування або простежувати прояви ландшафтних дистурбацій у динаміці. Обидва часові проміжки передаються у функцію обробки, де до них застосовується однакова послідовність процедур - від фільтрації супутникових даних до розрахунку індексів, що забезпечує методологічну узгодженість та достовірність результатів. Водночас вибір дат не є фіксованим: часові інтервали можуть змінюватися залежно від мети дослідження, сезонних особливостей території або специфічних потреб аналізу, що робить підхід гнучким і придатним для різних типів географічних завдань.

Наступний етап - блок в якому функція processPeriod виконує обробку даних для кожного окремого часового інтервалу (рис.2.14).

```
// ---- Helper function to process a time range ----
function processPeriod(startDate, endDate, AOI) {
  var S2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")
    .filterDate(startDate, endDate)
    .filterBounds(AOI)
    .filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'less_than', 5);
```

Рис.2.14. Частина коду, яка відповідає за вибір продуктів для обробки

На її початковому етапі здійснюється формування та фільтрація колекції Sentinel-2, що включає вибір продукту COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED, тобто поверхнево відкоригованих знімків із корекцією атмосферних впливів. Далі колекція послідовно обмежується за трьома критеріями:

- часовими межами (filterDate);
- просторовим охопленням досліджуваної території (filterBounds(AOI));
- показником хмарності, який не повинен перевищувати 5% (filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'less_than', 5)).

Така процедура забезпечує формування чистої вибірки оптичних даних із мінімальними атмосферними перешкодами, що є необхідною передумовою для точного розрахунку спектральних індексів і подальшого аналізу [64]. Використання тільки якісних знімків гарантує стабільність результатів

порівняння між різними періодами та мінімізує вплив хмарності на інтерпретацію змін у стані земної поверхні.

На наступному кроці в межах функції `processPeriod` здійснюється розрахунок спектральних індексів NDVI та BSI для кожного знімка колекції Sentinel-2 (рис.2.15).

```
// Add NDVI + BSI
var S2_with_indices = S2.map(function(image) {
  var ndvi = image.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('ndvi');
  var bsi = image.expression(
    '((B11 + B4) - (B8 + B2)) / ((B11 + B4) + (B8 + B2))',
    {
      'B11': image.select('B11'),
      'B4': image.select('B4'),
      'B8': image.select('B8'),
      'B2': image.select('B2')
    }
  ).rename('bsi');
  return image.addBands(ndvi).addBands(bsi);
});
```

Рис.2.15. Частина коду, яка відповідає за розрахунок спектральних індексів NDVI та BSI

NDVI обчислюється засобами методу `normalizedDifference(['B8', 'B4'])`, де канал B8 (NIR) відповідає ближньому інфрачервоному діапазону, а канал B4 (RED) - червоному видимому спектру; отримане значення записується до нового шару `ndvi` [28].

BSI реалізується через функцію `image.expression` на основі каналів B11 (SWIR1), B4 (RED), B8 (NIR) та B2 (BLUE) за співвідношенням виду $((B11 + B4) - (B8 + B2)) / ((B11 + B4) + (B8 + B2))$, результат якого формується у вигляді окремого банду `bsi` [72].

NDVI використовується для кількісної оцінки активної рослинності та стану рослинного покриву, тоді як BSI відображає ступінь «оголеності» поверхні, тобто збільшення частки ґрунтів, техногенно порушених або забудованих ділянок за умови зменшення рослинного покриву. Обидва індекси додаються до результуючого растра як нові спектральні канали/шари (`addBands`),

формуючи колекцію S2_with_indices з розширеним набором діагностичних показників для подальшого географічного аналізу.

Далі функція processPeriod здійснює формування тематичних масок на основі порогових значень індексів NDVI та BSI (рис.2.16).

```
// NDVI mask: [0.15, 0.2]
var ndviMask = S2_with_indices.map(function(image) {
  return image.select('ndvi').gt(0.1).and(image.select('ndvi').lt(0.2)).rename('ndvi_inRange');
}).max();

// BSI mask: [0.15, 0.2]
var bsiMask = S2_with_indices.map(function(image) {
  return image.select('bsi').gt(0.32).and(image.select('bsi').lt(1)).rename('bsi_inRange');
}).max();
```

Рис.2.16. Частина коду, яка відповідає за формування тематичних масок на основі порогових значень індексів NDVI та BSI

Для кожного знімка колекції створюється бінарна NDVI-маска, у якій пікселі з інтервальними значеннями $0.1 < NDVI < 0.2$ отримують значення 1, а всі інші - 0. Після цього до всієї колекції застосовується функція max(), що дозволяє сформувати підсумковий растр ndviMask: його значення 1 означає, що хоча б на одному знімку вибраного періоду відповідний піксель потрапив у заданий діапазон NDVI. Аналогічним чином будується маска bsiMask за критерієм $0.32 < BSI < 1$, що фіксує появу високих значень індексу відкритого ґрунту протягом періоду спостереження. Застосування таких порогів дає змогу виокремити пікселі з проміжними рівнями вегетації та підвищеною часткою оголеної поверхні, що є характерними ознаками деградованих агроландшафтів, малопродуктивних або занедбаних полів, техногенно порушених територій, а також ділянок, де рослинність частково збереглася, але зазнала змін. Формування цих масок створює основу для подальшого виявлення потенційних зон деградації та порівняння їх між різними часовими інтервалами [63].

Після цього у межах функції processPeriod виконується класифікація пікселів за поєднанням умов, що визначаються масками NDVI та BSI (рис.2.17).

```

// Classification
// 0 = none, 1 = NDVI only, 2 = BSI only, 3 = both
var classified = ndviMask.add(bsiMask.multiply(2)).clip(AOI);

return classified;
}

```

Рис.2.17. Частина коду, яка відповідає за класифікацію пікселів за поєднанням умов, що визначаються масками NDVI та BSI

Логіка кодування побудована таким чином, щоб обидві маски були об'єднані в один растр: значення ndviMask набуває 0 або 1, тоді як bsiMask перед множенням на 2 також має бінарні значення, але після множення формує другий біт класифікації.

У підсумку створюється растр classified, у якому:

- 0 означає відсутність пікселя в обох інтервальних умовах;
- 1 - відповідність лише порогам NDVI;
- 2 - відповідність лише порогам BSI;
- 3 - одночасну відповідність обом індексним критеріям.

Така схема дозволяє компактно зашифрувати чотири різні стани пікселя в одному шарі без необхідності використання складних багатоканальних структур. Отримана класифікація є важливою підготовчою ланкою для подальшого аналізу, оскільки дає можливість порівнювати просторові патерни між різними роками, виділяти стабільні проблемні зони або ділянки потенційної деградації, де одночасно фіксуються низькі показники NDVI та високі значення BSI. Це створює основу для поглибленої оцінки динаміки стану агроландшафтів та виявлення зон стійких змін [70].

Наступний етап структури сценарію передбачає виклик функції processPeriod окремо для двох визначених часових інтервалів - Period A (2024 рік) та Period B (2025 рік) (рис.2.18).

```

// ---- Run for both periods ----
var classified_A = processPeriod(startDate_A, endDate_A, AOI);
var classified_B = processPeriod(startDate_B, endDate_B, AOI);

```

Рис.2.18. Частина коду, яка відповідає за виклик функції processPeriod

Внаслідок цього формуються два незалежні результати: `classified_A` - класифікаційна карта для першого періоду, та `classified_B` - аналогічна карта для другого.

Такий підхід гарантує повністю ідентичну логіку обробки для обох часових проміжків, включно з фільтрацією даних, розрахунком індексів, формуванням масок і процедурою класифікації. Узгодженість обробки є ключовою передумовою коректного аналізу змін, оскільки дозволяє виключити вплив методологічних відмінностей і забезпечує порівнюваність результатів. Саме тому послідовне застосування однієї функції до обох періодів створює надійну основу для подальшого виявлення змін (change detection) та інтерпретації динаміки стану поверхні між 2024 і 2025 роками [69].

На наступному етапі здійснюється виокремлення стабільно деградованих ділянок на основі результатів класифікації для двох часових періодів (рис.2.19).

```
// ---- Intersection: pixels that are "both NDVI+BSI" in both periods ----
var intersectBoth = classified_A.eq(3).and(classified_B.eq(3)).selfMask(); // Keep only pixels with value 1
```

Рис.2.19. Частина коду, яка відповідає за виокремлення стабільно деградованих ділянок на основі результатів класифікації для двох часових періодів

Для цього з класифікаційних rasterів `classified_A` та `classified_B` вибираються пікселі, що належать до класу 3, тобто одночасно відповідають пороговим умовам для NDVI та BSI: операції `classified_A.eq(3)` та `classified_B.eq(3)` формують відповідні бінарні маски для періодів 2024 та 2025 років. Далі застосовується логічний оператор `and(...)`, який визначає просторовий перетин цих масок і присвоює значення 1 лише тим пікселям, що в обох роках послідовно характеризувалися поєднанням низько- або середньовегетативних NDVI-значень із високими показниками індексу оголеного ґрунту BSI.

Функція `selfMask()` використовується для того, щоб у підсумковому шарі візуалізувалися лише пікселі зі значенням 1, тоді як усі інші переводяться в стан `NoData`, що покращує інтерпретованість карти [55]. У такий спосіб виділяються просторово стійкі «проблемні» зони, де протягом щонайменше двох вегетаційних сезонів зберігаються ознаки деградації: тривале занедбання полів, повторювані пошкодження, наявність вирв, техногенних об'єктів або інших типів порушення поверхні, що є важливими індикаторами довготривалих ландшафтних дистурбацій.

Наступним кроком є перехід від піксельного представлення стабільно деградованих ділянок до їхньої об'єктної інтерпретації за допомогою оператора `connectedComponents` (рис.2.20).

```
// ---- Label connected clusters (8-connected) ----
var connected = intersectBoth.connectedComponents(ee.Kernel.plus(1), 1024);
```

Рис.2.20. Частина коду, яка відповідає за об'єктну інтерпретацію за допомогою оператора `connectedComponents`

Ця функція застосовується до бінарної маски `intersectBoth` і виконує пошук просторово зв'язаних областей (кластерів), використовуючи 8-зв'язність, задану ядром `ee.Kernel.plus(1)`, за якої сусідніми вважаються пікселі, що контактують по горизонталі, вертикалі або діагоналі [53].

Параметр 1024 задає максимальний допустимий розмір компоненти в пікселях, що дозволяє обмежити обчислювальну складність процесу сегментації. У результаті формується растровий шар, у якому кожному кластеру присвоюється унікальний ідентифікатор у шарі `labels`, що фактично переводить маску з окремих «точкових» пікселів у набір просторово осмислених об'єктів. Надалі це дає змогу оцінювати площі та морфометричні характеристики кластерів, відсікати дрібні шумові плями та виокремлювати значущі за розміром і конфігурацією зони стійких ландшафтних порушень.

На цьому етапі формується допоміжний растр `ones`, у якому всім пікселям у межах маски `intersectBoth` присвоюється значення 1 (рис.2.21):

```
// ---- Add a constant band to count pixels per cluster ----
var ones = ee.Image(1).updateMask(intersectBoth);
```

Рис.2.21. Частина коду, яка відповідає за формування допоміжного растру

Маскування гарантує, що поза межами зони спільної належності пікселів до класу «NDVI+BSI» у двох часових періодах жодних значень не зберігається. Іншими словами, растр не містить пікселів, що задовольняли умову лише в одному році або випадково потрапили до діапазону через локальні атмосферні або сезонні коливання. У фінальному маскованому шарі залишаються лише ті пікселі, які одночасно відповідали критеріям індексів і у періоді А, і у періоді В, тобто є стабільними у часі й мають найбільшу аналітичну цінність.

Завдяки цьому растр містить виключно інформаційно важливі пікселі, що репрезентують стійкі деградовані ділянки, підтверджені двома незалежними наборами даних. Такий підхід дозволяє використовувати ones як лічильний шар у подальшому аналізі: підсумовуючи одиничні значення в межах кожної просторово зв'язаної компоненти, система визначає кількість пікселів, що входять до відповідного кластера. Це забезпечує можливість об'єктивної оцінки розмірів та геометричних параметрів стійко порушених територій, необхідних для подальшого кількісного аналізу їхніх просторових характеристик.

Після цього здійснюється об'єднання растрів ones та labels у спільний двоканальний растр (зображення), після чого застосовується операція reduceConnectedComponents [54] із редуктором ee.Reducer.count() (рис.2.22):

```
// ---- Count pixels in each cluster ----
var clusterSizes = ones.addBands(ee.Image(connected.select('labels'))
  .reduceConnectedComponents({
    reducer: ee.Reducer.count(),
    labelBand: 'labels'
  }).rename('cluster_size');
```

Рис.2.22. Частина коду, яка відповідає за об'єднання растрів ones та labels у спільний двоканальний растр

Така методика дає змогу для кожного унікального кластера (визначеного за шаром labels) підрахувати кількість пікселів, що містять значення 1 у растрі ones. У результаті формується растр clusterSizes, де кожен піксель отримує значення, яке відповідає загальному розміру його кластеру, тобто кількості пікселів, що входять до відповідної просторово зв'язаної компоненти. Отриманий шар надає можливість поділити кластери за їхньою площею: великі за розміром компоненти відображають потенційно значущі об'єкти, такі як масиви порушених агроугідь або протяжні техногенні зони, тоді як дрібні кластери найчастіше є шумовими артефактами або локальними змінами, які не мають суттєвого просторового значення. Це забезпечує якісну фільтрацію результатів та дозволяє зосередитися на просторово стабільних ознаках деградації.

Далі проводиться поділ просторових кластерів за їхнім розміром на основі отриманого растра clusterSizes (рис.2.23).

```
// ---- Define large and small clusters ----
var largeClusters = clusterSizes.gt(50).selfMask(); // > 50 pixels
var smallClusters = clusterSizes.lte(50).selfMask(); // ≤ 50 pixels
```

Рис.2.23. Частина коду, яка відповідає за поділ просторових кластерів за їхнім розміром на основі отриманого растра clusterSizes

Заданий поріг площі кластерів використовується для розмежування значущих та малих просторових компонентів на основі растра clusterSizes. Умова clusterSizes.gt(500) дає змогу виокремити кластери, площа яких перевищує 50 пікселів, тоді як clusterSizes.lte(50) формує набір дрібніших компонентів із площею до 500 пікселів включно. Використання selfMask() забезпечує коректну візуалізацію: залишаються видимими лише ті пікселі, які належать відповідній групі кластерів, а всі інші переводяться у стан NoData. У результаті отримуються два окремі шари: largeClusters, що представляють масивні й просторово стійкі зони потенційної деградації або порушень, цінні для подальшого аналізу; та smallClusters, які містять дрібні фрагменти, що можуть бути менш

інформативними або навіть відображати залишковий шум та артефакти обробки. Такий поділ дозволяє сфокусувати увагу на найбільш значущих просторових аномаліях і покращує якість інтерпретації результатів [48].

Наступний крок передбачає налаштування параметрів відображення результатів та їх додавання на карту (рис.2.24).

```
// ---- Visualization ----
var visParams = {
  min: 0,
  max: 3,
  palette: ['black', 'green', 'orange', 'red']
  // black = none, green = NDVI only, orange = BSI only, red = both
};

Map.addLayer(classified_A, visParams, 'Period A (NDVI+BSI)');
Map.addLayer(classified_B, visParams, 'Period B (NDVI+BSI)');
Map.addLayer(largeClusters, {palette: ['blue']}, 'Large Intersection Clusters (>500px)');
Map.addLayer(smallClusters, {palette: ['purple']}, 'Small Intersection Clusters (≤500px)');
```

Рис.2.24. Частина коду, яка відповідає за налаштування параметрів відображення результатів та їх додавання на карту

Об'єкт visParams задає кольорову схему для класифікаційного растра з класами від 0 до 3, що забезпечує чітке розмежування станів поверхні за поєднанням значень NDVI і BSI. На карту послідовно додаються кілька шарів: класифікаційна карта для періоду А, класифікаційна карта для періоду В, а також растр великих (синіх) та малих (фіолетових) кластерів перетину, отриманих у результаті аналізу просторової стабільності порушень. Застосування цієї візуалізація дозволяє оперативно оцінити просторовий розподіл класів для кожного року, порівняти їх між собою та визначити ділянки, де потенційні ознаки деградації зберігаються протягом двох сезонів. Крім того, наочне відображення форм, розмірів і конфігурацій кластерів полегшує інтерпретацію результатів та допомагає виділити найбільш значущі зони ландшафтних змін [62].

Завершальним етапом роботи скрипту є експорт отриманих результатів у форматі GeoTIFF для подальшого офлайн-аналізу (рис.2.25).


```
// ---- Export ----
Export.image.toDrive({
  image: classified_A,
  description: 'Classified_AOI_PeriodA',
  region: AOI,
  scale: 10,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

Export.image.toDrive({
  image: classified_B,
  description: 'Classified_AOI_PeriodB',
  region: AOI,
  scale: 10,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

Export.image.toDrive({
  image: largeClusters,
  description: 'largeClusters',
  region: AOI,
  scale: 10,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});

Export.image.toDrive({
  image: smallClusters,
  description: 'smallClusters',
  region: AOI,
  scale: 10,
  fileFormat: 'GeoTIFF'
});
```

Рис.2.25. Частина коду, яка відповідає за експорт отриманих результатів у форматі GeoTIFF

У вигляді растрових шарів зберігаються чотири ключові продукти: `classified_A` - класифікаційна карта для періоду А, `classified_B` - аналогічна класифікація для періоду В, а також `largeClusters` і `smallClusters`, що представляють відповідно великі та малі стабільні кластери перетину. Параметр `region: AOI` обмежує експорт межами досліджуваної території, тоді як `scale: 10` задає просторову роздільність експортованих растрів на рівні 10 м на піксель. Експортовані GeoTIFF-файли можна завантажити та відкрити в професійних ГІС-середовищах, таких як ArcGIS Pro або QGIS, де вони можуть бути використані для поглибленого аналізу: розрахунку площ кластерів, перетину з кадастровими межами полів, оцінки просторової структури пошкоджень, порівняння з іншими джерелами даних або інтеграції в подальші картографічні

та аналітичні проєкти. Такий крок забезпечує перенесення результатів із хмарного середовища GEE у локальні ГІС-системи для детальної географічної інтерпретації [57].

Скрипт реалізує повний алгоритм виявлення стабільних ознак деградації поверхні за двома сезонними періодами на прикладі 2024 і 2025 років. Спершу фільтруються знімки Sentinel-2, для яких обчислюються індекси NDVI та BSI як показники стану рослинності й оголеності ґрунту. На основі порогових значень формується класифікація пікселів, а потім виділяються ті, що одночасно мають низький NDVI і високий BSI в обох роках. Далі ці пікселі групуються в просторові кластери, для яких визначається їхній розмір. Це дозволяє відокремити великі, потенційно значущі зони порушень від дрібних або шумових об'єктів. Отримані результати візуалізуються та експортуються для детального аналізу в ГІС-середовищах.

Оскільки прямі ознаки бойових дій на оптичних супутникових зображеннях можуть бути згладжені протягом двох-трьох років після подій, у роботі застосовано підхід аналізу функціональної активності агроландшафтів як опосередкованого індикатора порушення території. Аномальні просторові патерни - стійке невикористання земель, випадіння ділянок із традиційного сезонного циклу, зниження індексів вегетації або поява відкритих поверхонь у нетипові періоди - можуть свідчити про вторинні наслідки бойових дій, такі як мінування, деградація ґрунтів, утворення деформацій мікрорельєфу чи порушення шляхів доступу до полів.

РОЗДІЛ III.

ГІС-АНАЛІЗ ПОРУШЕНЬ ЛАНДШАФТІВ БАЛАКЛІЙСЬКОЇ ГРОМАДИ НА ОСНОВІ ДАНИХ ДЗЗ (на прикладі агроландшафтів)

3.1. Аналіз території дослідження за обраною методикою

Оскільки агроландшафти становлять значну частку території Балаклійської громади та є одним із найбільш чутливих компонентів ландшафтної структури до зовнішніх впливів, зміни в режимах їхнього функціонування можуть виступати індикаторами поствоєнних порушень. Воєнні дії 2022 року спричинили не лише прямі руйнування, але й опосередковані наслідки - мінування, пошкодження ґрунтового покриву, порушення мікрорельєфу, тимчасове виведення земель з обробітку. Тому аналіз просторових патернів функціонування агроландшафтів за допомогою супутникових індексів розглядається як один із методів виявлення змінених або порушених ландшафтів на постраждалих територіях.

У межах проведеного дослідження було сформовано класифіковані растрові зображення, отримані в результаті застосування розробленої методики (викладеної у 2 розділі) аналізу стану агроландшафтів Балаклійської громади.

На основі оптичних супутникових даних Sentinel-2 розраховано індекси NDVI та BSI, після чого визначені їх оптимальні порогові значення для виділення відкритих ґрунтів та територій з відсутністю рослинності. Отримані показники свідчать про потенційно розорані площі, так як в природі ґрунтовий покрив не може повністю втратити рослинний покрив.

Візуалізація результатів класифікації представлена у вигляді двох растрів, де кожен спектральний індикатор відображений окремим кольором (рис.3.1):

- зелений колір відповідає ділянкам, значення NDVI яких потрапили в обраний проміжок;

- жовтий - областям з індексом BSI, характерним для відкритих або деградованих ґрунтів;
- червоний - зонам, де обидва індекси перетинаються, що свідчить про високу ймовірність оброблюваних полів.

Таке поєднання дозволяє комплексно оцінити стан територій і закласти основу для подальшого просторового аналізу.

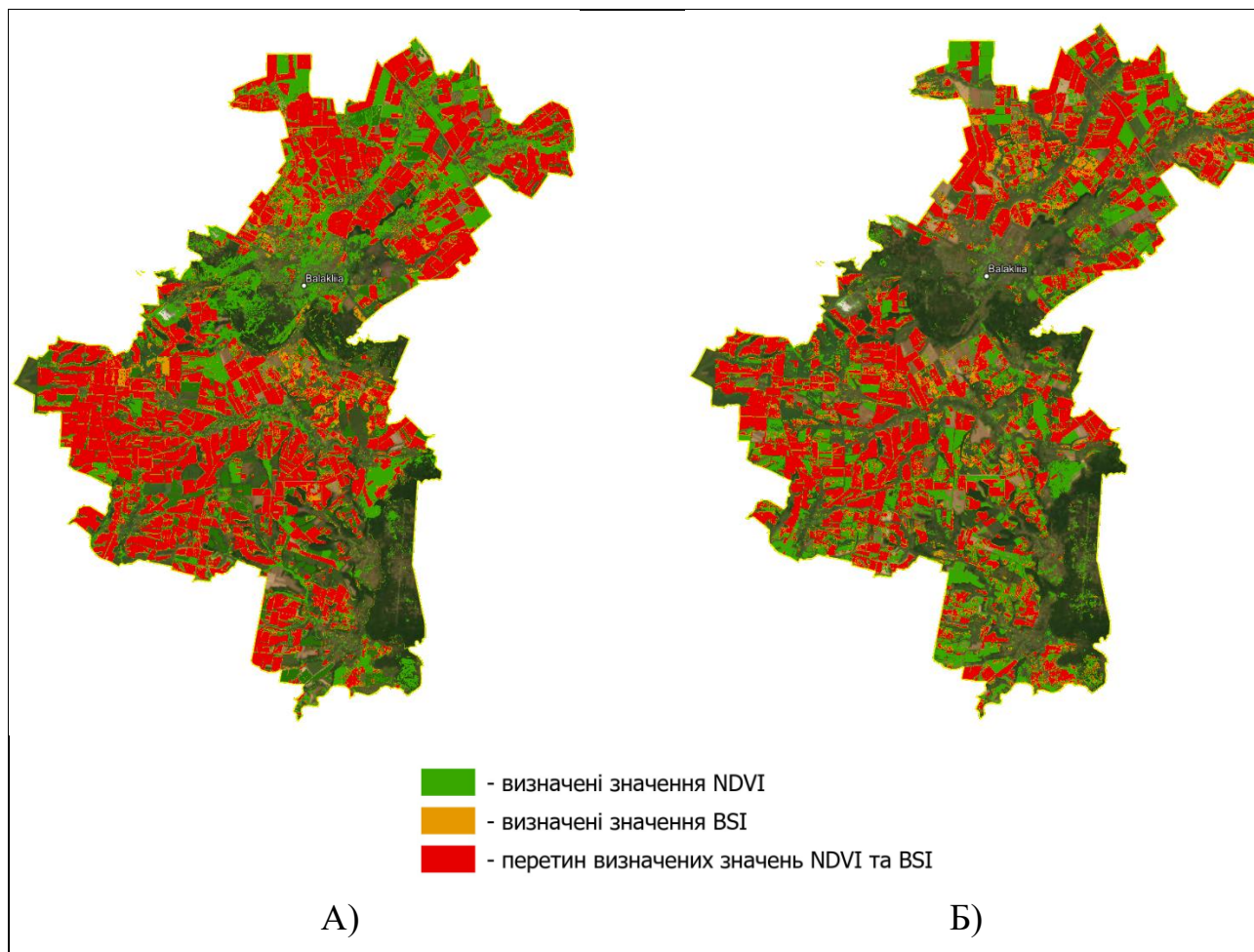


Рис.3.1. Класифікація стану агроландшафтів Балаклійської громади: А) період 01.03.2025 - 30.06.2025; Б) період 01.09.2025 - 31.10.2025 (укладено автором)

Після отримання класифікаційних растрів було здійснено їх загальний огляд і порівняльний аналіз, який дав змогу окреслити сезонні особливості функціонування агроландшафтів Балаклійської громади.

У зв'язку з тим, що прямі наслідки бойових дій 2022 року на оптичних знімках 2025 року частково згладжені природними та господарськими процесами, в роботі застосовано підхід аналізу агроландшафтної активності як індикатора поствоєнної деградації та стану відновлення ландшафтів громади станом на 2025 рік.

Для дослідження сформовано дві окремі синтезовані сцени: весняний класифікований растр за період 01.03.2025 - 30.06.2025 (рис.3.1.А) та осінній класифікований растр за період 01.09.2025 - 31.10.2025 (рис.3.1.Б). Обрані часові інтервали представлено найактуальнішими даними для досліджуваної території, у межах яких вибрані спектральні індекси демонструють коректні значення. Використання двох періодів дозволило оцінити стабільність методики в умовах різних фенологічних фаз та підтвердити повторюваність просторових моделей землекористування.

Обидва класифікаційні растри були отримані за єдиним алгоритмом, реалізованим у програмному коді. Індекси NDVI та BSI були нормалізовані за визначеними пороговими значеннями й інтегровані у багатоканальний класифікований шар.

Саме червоний клас виступає ключовим результатом методики, оскільки він чітко фіксує оброблені (зорані) поля, тобто ті території, де відсутність рослинного покриву є наслідком обробки сільськогосподарських угідь.

Стійка відсутність обробітку протягом кількох сезонів після деокупації а також неоднорідні спектральні характеристики в межах полів може свідчити про збереження наслідків бойових дій (мінування, руйнування ґрунту, зміни мікрорельєфу, небезпеку техногенного характеру).

Класифікація цілеспрямовано орієнтована на виявлення агроландшафтів зі стабільним функціонуванням та з ознаками порушень. Відповідно, усі інші території, що не увійшли до червоного класу, або мають лише окремі прояви NDVI чи BSI, віднесені до категорії невизначених. Такі площі потребують додаткової перевірки, зокрема шляхом детального дешифрування оптичних

знімків, аналізу динаміки змін за інші періоди або застосування додаткових індексів. Лише така комбінована верифікація дозволяє впевнено віднести їх до необроблюваних чи занедбаних земель.

Порівняння весняної та осінньої класифікацій демонструє високий рівень повторюваності ключових просторових структур. Весняний растр (01.03-30.06) характеризується значним домінуванням червоних кластерів, що відповідає фазі перед початком активної вегетації, коли поля здебільшого перебувають у стані оранки чи передпосівної підготовки. Осінній растр (01.09-31.10) також демонструє широку присутність червоного класу, що узгоджується зі станом полів після збору врожаю, коли рослинний покрив знову відсутній. Дана сезонна узгодженість підтверджує валідність порогових значень індексів та надійність методики для картографування оброблюваних площ.

Зелені ділянки NDVI стабільно локалізуються у межах лісових та заплавних територій, а також на ділянках багаторічних культур, де рослинність не зникає навіть у міжсезоння. Жовті зони BSI переважно проявляються на межах полів, польових дорогах або ділянках оголеного ґрунту, що не має прямого зв'язку з аграрною діяльністю. Лише ті ділянки, у яких NDVI та BSI одночасно потрапляють у визначені порогові діапазони, що відповідають оброблюваним полям (позначені червоним класом), можуть вважатися достовірно ідентифікованими. Поєднання двох незалежних індексів мінімізує ризик хибної класифікації й забезпечує точне виділення територій, що характеризують агроландшафти зі стабільним функціонуванням.

Отже, результати сезонної класифікації демонструють стабільні закономірності, що підтверджують ефективність обраного підходу для ідентифікації оброблюваних земель у межах Балаклійської громади. Отримані растрові продукти слугують базою для подальшої картографічної інтерпретації та просторового аналізу порушень.

3.2. Візуалізація та просторовий аналіз порушень ландшафтів на основі результатів дослідження

Візуалізація результатів класифікації супутникових знімків та подальший просторовий аналіз є ключовими етапами оцінки стану агроландшафтів Балаклійської громади. Отримані картографічні матеріали дають змогу графічно представити структуру оброблених і порушених територій, а також виявити закономірності їхнього просторового поширення, інтенсивність впливу воєнних дій та відповідність автоматизованих результатів фактичному стану полів. Поєднання класифікованих даних різних сезонів із ручним аналізом забезпечує комплексне розуміння характеру порушень і дозволяє встановити, які зміни мають стійкий, тимчасовий або локалізований характер.

Карта на рис.3.2 демонструє просторову структуру оброблених та необроблених сільськогосподарських земель Балаклійської громади станом на 30.09.2025. Ці полігони були зібрані напівавтоматичним методом з візуальною верифікацією стану полів. Спираючись на дану інформацію можна вважати отриману карту точною і використовувати для порівняння з автоматично визначеними результатами для перевірки їх достовірності.

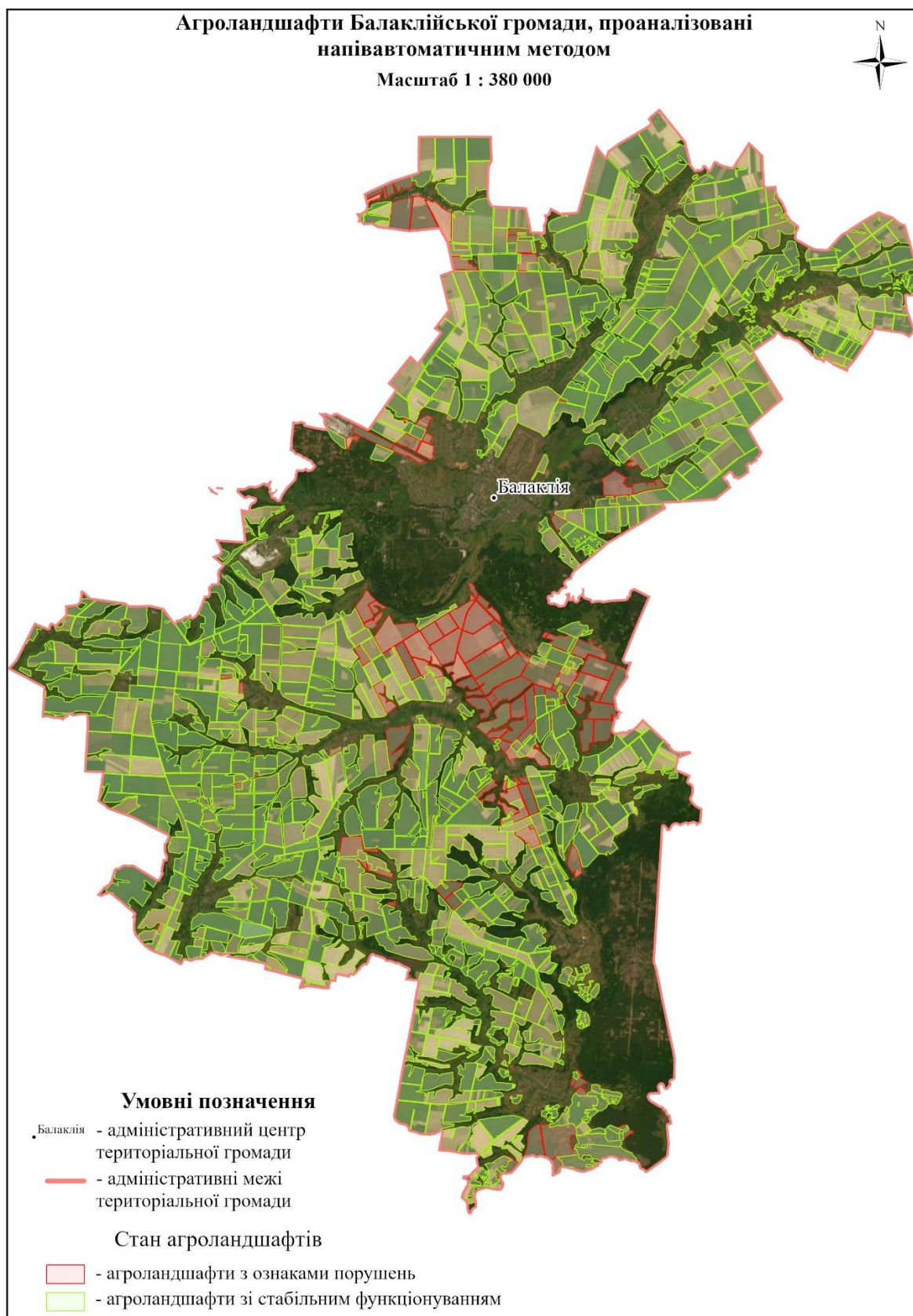


Рис.3.2. Агроландшафти Балаклійської громади станом на 31.10.2025, проаналізовані напівавтоматичним методом (укладено автором)

Візуальний розподіл полігонів чітко окреслює два типи:

- зеленим кольором - території, що активно використовуються в аграрному виробництві;
- червоним кольором - ділянки, які станом на жовтень 2025 року не піддаються обробці.

Просторовий характер розподілу цих полігонів дозволяє не лише оцінити сучасний стан земель, але й простежити тісний зв'язок між необробленими ділянками та зонами інтенсивних воєнних дій.

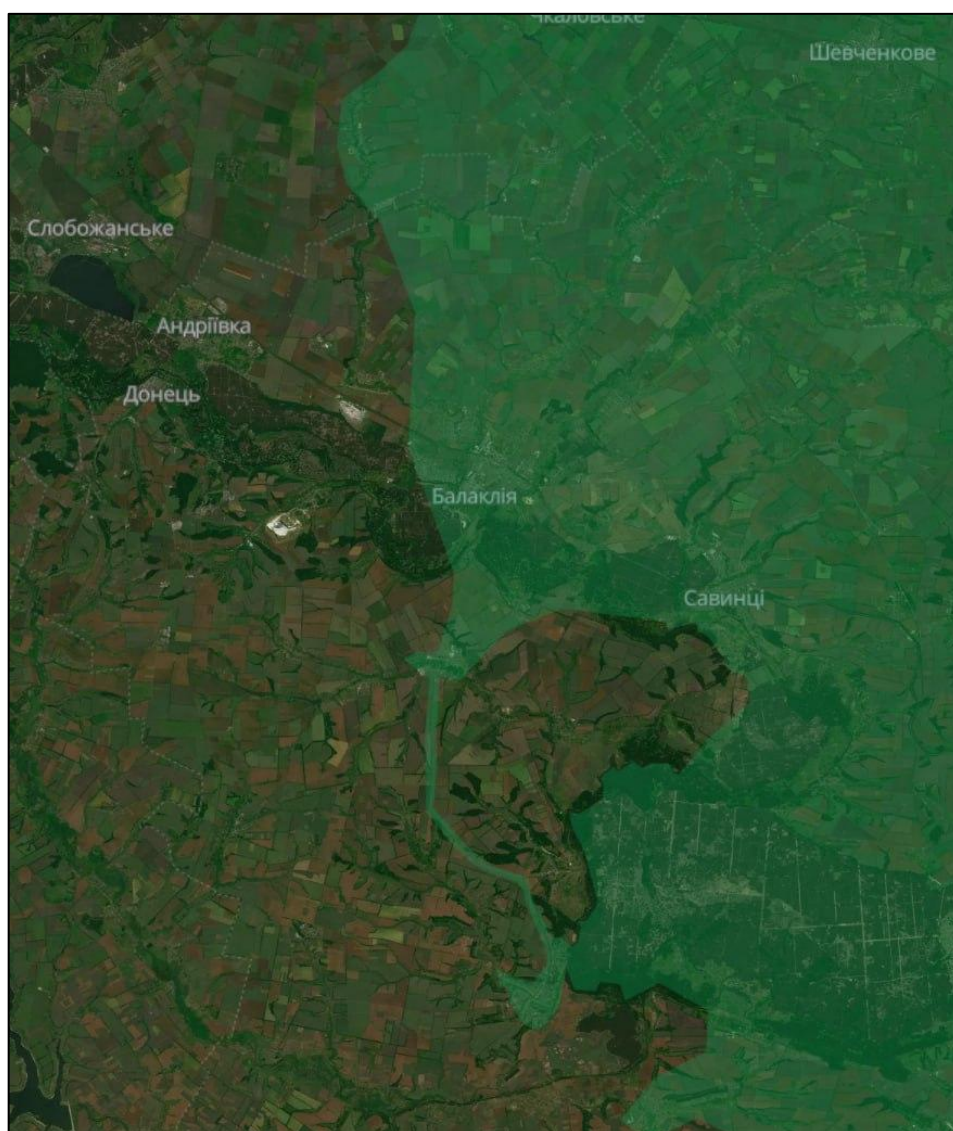


Рис.3.3. Деокуповані території Балаклійської громади, станом 05.11.2025

Найбільша концентрація територій з ознаками порушень спостерігається у центральному та південно-східному районах громади. Саме в цій частині у 2022 році відбувалися інтенсивні бойові дії та тривала окупація, що супроводжувалося суттєвим пошкодженням об'єктів інфраструктури.

Водночас на півночі та південному-заході громади простежується домінування оброблених сільськогосподарських площ, що відображаються суцільними й однорідними зеленими полігонами. Така конфігурація свідчить про збереження або швидке відновлення агровиробничих процесів у цих територіальних межах після завершення активної фази бойових дій. Просторова однорідність полігонів та відсутність вираженої фрагментації вказують на відносно низький рівень порушення землекористування. Висока концентрація необроблювальних територій в центрі та південному-сході дозволяє припустити нерівномірність воєнного впливу, де північні та південно-західні ділянки залишалися або менш ураженими, або швидше повернулися до обробки сільськогосподарських угідь.

Таким чином, просторовий контраст між зеленими та червоними полігонами чітко вказує на вплив війни на стан аграрного сектору Балаклійської громади: необроблені території формують локальні кластери, які тісно корелюють з розташуванням лінії фронту, ймовірними зонами мінування та ділянками, що зазнавали систематичних артилерійських обстрілів.

Представлена карта слугує вихідним просторовим матеріалом, який дає змогу окреслити початкову конфігурацію оброблених і необроблених сільськогосподарських угідь, а також зафіксувати рівень їх пошкоджень перед порівняльним аналізом автоматичною класифікацією супутникових знімків.

Для подальшого дослідження було обрано два сезони - весна та осінь, які найбільш точно демонструють реальний стан землекористування.

На рисунку 3.4 представлена карта періоду 01.03-30.06.25 року, що відображає результати автоматичної класифікації стану агроландшафтів у межах Балаклійської громади. Переважають полігони позначені темно-зеленим

кольором, які автоматично визначені як агроландшафти зі стабільним функціонуванням. Це характерно для початку весняного циклу, коли на більшості полів уже виконано ґрунтову підготовку чи посівні роботи.

Проводячи порівняння з картою напіваавтоматичним методом, бачимо відповідність для більшості великих та середніх за площею полів: ті ділянки, які були визначені вручну як оброблювані, автоматична класифікація також фіксує як активні. Найбільш точним збіг є у північно-східній та південно-західній частинах громади, де структура стабільно функціональних земель практично не змінилася.

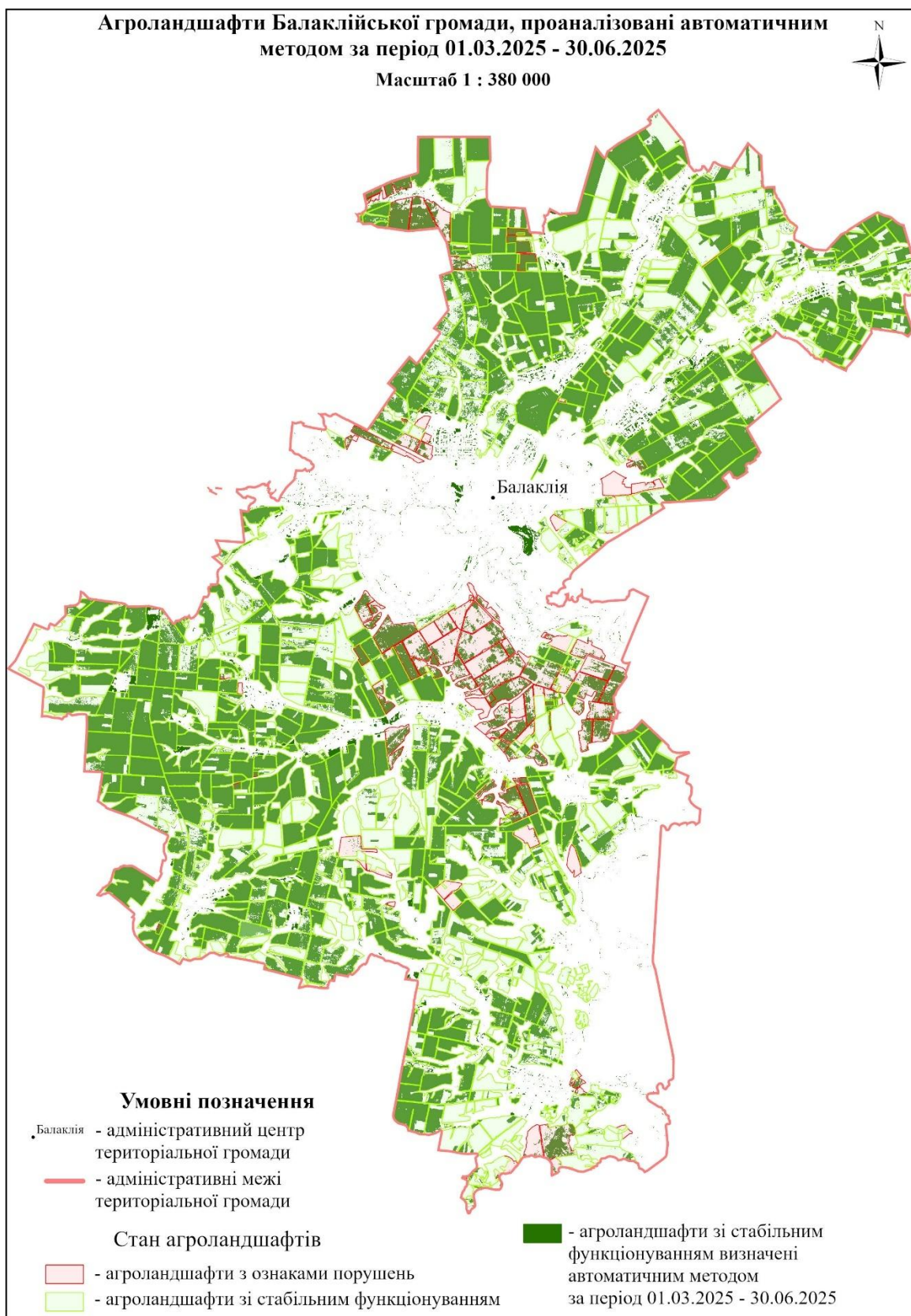


Рис.3.4. Агrolандшафти Балаклійської громади, проаналізовані автоматичним методом за період 01.03.2025 - 30.06.2025 (укладено автором)

Водночас виявлено низку локальних розбіжностей у шарах. У південній зоні, де під час ручного аналізу було зафіксовано велику кількість агроландшафтів з ознаками порушень, автоматична класифікація частково визначає окремі з них як стабільні. Це може бути зумовлено ранньою весняною фазою, коли різниця між посівами, стернею та відкритим ґрунтом є мінімальною, а індексні показники наближаються до порогових значень. На таких ділянках система може інтерпретувати несуттєве втручання як ознаку агровикористання.

Ще однією невідповідністю є територія південно-східної частини громади, де напівавтоматичним аналізом було виявлено концентрацію порушених агроландшафтів через інтенсивні бойові дії та окупацію. Хоча автоматична класифікація весняного періоду позначає частину цих ділянок зеленим кольором, ручна перевірка показала, що не всі з них фактично були повернуті до повноцінного сільськогосподарського використання, зокрема, дрібні фрагменти всередині великих полів мають залишкові ознаки деградації.

Таким чином, весняна карта загалом підтверджує результати попереднього етапу дослідження, однак виявляє низку сезонних та локальних невідповідностей, пов'язаних із ранньою фазою вегетації та особливостями спектрального відбиття ґрунту. Це підкреслює необхідність подальшої перевірки результатів за даними осіннього періоду, коли контраст між стабільно функціональними та порушеними агроландшафтами є суттєвішим і менш чутливим до короткочасних сезонних змін.

Осіня карта (рис.3.5) відображає результати автоматичної класифікації агроландшафтів Балаклійської громади під час та після завершення збору врожаю.

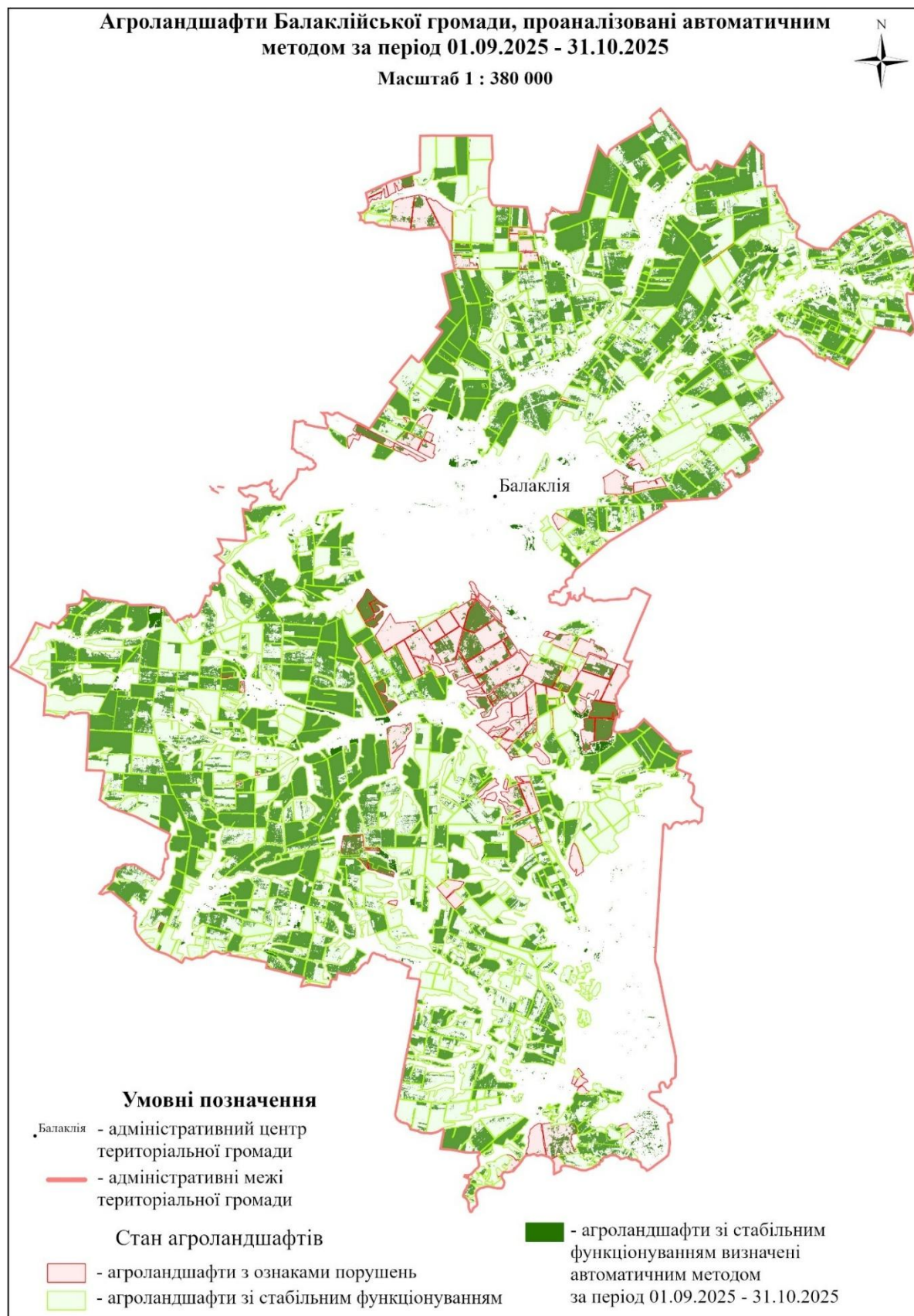


Рис.3.5. Агрорландшафти Балаклійської громади, проаналізовані автоматичним методом за період 01.09.2025 - 31.10.2025 (укладено автором)

Даний сезон було обрано як другий часовий інтервал, оскільки у літній період обидва індекси NDVI та BSI зазнають сезонної зміни: NDVI різко зменшується через висихання рослинності, тоді як BSI підвищується на всіх типах поверхні внаслідок втрати вологи та зміни відбивної здатності ґрунту. У результаті їхні значення стають подібними як для оголеного ґрунту, так і для сухих рослинних решток, що унеможливорює надійну класифікацію відкритих поверхонь у літній сезон.

На карті осіннього періоду спостерігається значне поширення полігонів, класифікованих як стабільно функціональні (темно-зелений колір), що повністю відповідає фенологічній фазі після збирання урожаю, коли значна частина полів перебуває в стані відкритого ґрунту або мінімальних залишків рослинності. Просторове розташування оброблених ділянок демонструє виразну узгодженість із результатом класифікації за осінній період: основні масиви орних земель у північній, західній та південній частинах громади зберігають стабільні контури та форми.

Вирізняється центрально-східна зона, яка на першій карті напівавтоматичного аналізу була віднесена до ділянок із високою часткою порушених агроландшафтів. Осіння класифікація частково підтверджує ці дані: на більшості цих територій продовжують фіксуватися світлі та незаповнені полігони, що свідчить про відсутність систематичного обробітку. Водночас автоматична класифікація виділяє в межах цього кластера окремі зелені ділянки, які за індексними значеннями відповідають ознакам функціональних агроландшафтів. Це можуть бути як фрагменти полів, що зазнали часткової обробки, так і ділянки з повною відсутністю рослинності внаслідок природних процесів або інших видів антропогенного впливу, зокрема механічного розмінування, а не сільськогосподарських робіт. Подібні ситуації потребують додаткової перевірки, оскільки класифікація індексів не завжди здатна розрізнити агротехнічну діяльність і деградаційні процеси.

Таке порівняння весняного та осіннього періодів підтверджує, що стабільні сільськогосподарські території зберігають свою конфігурацію в обох випадках. Це особливо помітно в південній та північно-східній частині громади, де зелені полігони повторюють ті самі межі, що й у весняній класифікації, що свідчить про використання у сільському господарстві цих полів протягом року. При цьому у проблемних зонах, що зазнали найбільшого впливу бойових дій, осінні результати підкреслюють наявність порушених агроландшафтів.

Таким чином, класифікація за 01.09.2025 - 31.10.2025 демонструє високу інформативність, оскільки чітко відділяє поля, що дійсно перебувають у стані підготовки після сезону збору врожаю, від ділянок, які залишаються неораними протягом кількох сезонів.

Карта на рис.3.6 відображає скомбінований результат класифікації агроландшафтів зі стабільним функціонуванням за два ключові сезони: весняний та осінній періоди 2025 року та дозволяє зіставити їх із попередньо проведеним ручним аналізом території. Об'єднання двох сезонів дає можливість виділити ділянки, які стабільно проявляли ознаки стабільного функціонування (в обох класифікаційних растрах), а також встановити фрагменти зі змінною інтерпретацією індексів.

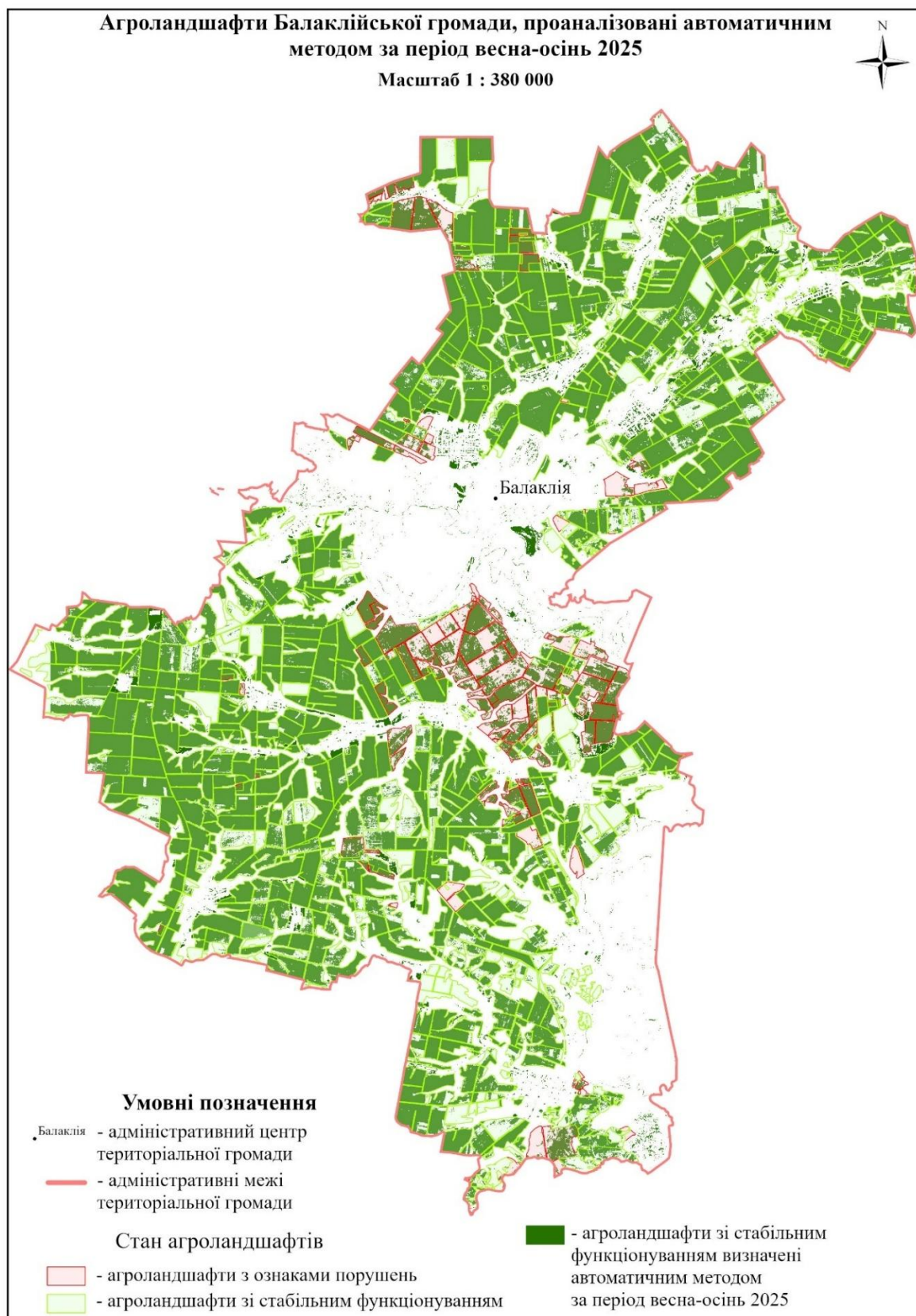


Рис.3.6. Аглоландшафти Балаклійської громади, проаналізовані автоматичним методом за періоди весна-осінь 2025 року (укладено автором)

Загальний просторовий розподіл зелених полігонів демонструє високу відповідність результатам ручного аналізу. Основні орні землі громади, насамперед на півдні, південному заході та півночі, стабільно визначалися автоматизованим алгоритмом аналізу як стабільно функціональні в обох сезонах, що підтверджує достовірність обраних порогових значень NDVI і BSI. Ця відповідність особливо помітна на великих й середніх за площею ділянках, де спектральні показники є більш однорідними, а межі полів - чітко окресленими.

Просторові розбіжності між ручним і автоматичним аналізом зберігаються переважно на тих територіях, що зазнали значного антропогенного чи воєнного впливу. У центрально-східній частині громади простежуються агроландшафти, які ручний аналіз визначав як з ознаками порушень, тоді як автоматична класифікація часом відносила окремі їх фрагменти до функціонально стабільних. Такі випадки пояснюються тим, що на окремих ділянках спектральна відбивна здатність може відповідати відкритому ґрунту, але не бути результатом агротехнічної діяльності. Це стосується, зокрема, територій, де рослинність була знищена неприродними процесами (наприклад, механічним розмінуванням або пересуванням техніки).

У процесі класифікації було відмічено, що ділянки зі зниженою або порушеною функціональною активністю мають фрагментований вигляд і не формують цілісних контурів агроландшафтів. З огляду на це в роботі застосовано правило інтерпретації: ділянка вважається такою, що перебуває у стані стабільного сільськогосподарського використання, лише якщо класифікований покрив формує просторово суцільний полігон. Окремі фрагменти або локальні «спалахи» індексів розглядаються як спектральні артефакти чи випадкові прояви рослинності, а не як свідчення реального відновлення або активного використання території.

Отримана комплексна карта за два сезони підтверджує, що методика коректно виявляє оброблювані території агроландшафтів, оскільки поля, які

активно використовуються протягом року, позначені зеленим кольором у весняний та осінній періоди.

Порівняння напівавтоматичного аналізу з результатами повністю автоматичної класифікації за двома сезонами демонструє їхню відповідність. Обидва підходи узгоджено окреслюють основні орні території Балаклійської громади та підтверджують стабільність сільськогосподарського використання більшості територій агроландшафтів громади.

Отже, зіставлення результатів показало, що алгоритм найкраще розпізнає перепахані та стабільно культивовані поля, тоді як окремі неоднорідні або деградовані території можуть частково потрапляти до оброблених через специфіку індексних значень. Втім, завдяки правилу виключення невеликих фрагментованих територій під час класифікації ці неоднозначності успішно мінімізуються.

Таким чином, поєднання напівавтоматичного та автоматизованого підходів забезпечує комплексну, верифіковану та достовірну оцінку стану агроландшафтів, дозволяючи чітко розмежувати стабільно оброблені площі, проблемні ділянки та території, що зазнали деградації чи воєнного впливу.

3.3. Оцінка порушень внаслідок впливу воєнних дій на агроландшафти Балаклійської громади

Комплексне поєднання ручного та автоматичного аналізу супутникових даних дозволило оцінити масштаб і характер порушень агроландшафтів Балаклійської громади, спричинених воєнними діями 2022 року. У зв'язку з тим, що громаду було деокуповано у 8 вересня 2022 року, частина ландшафтів уже встигла відновитися, поля, що були обстежені саперами, повернутися до сільськогосподарського використання у 2023-2025 роках. Це необхідно враховувати при інтерпретації отриманих результатів, оскільки вони

відображають не лише наслідки бойових дій, але й певну динаміку відновлення агроландшафтів.

Після деокупації на значній частині території проводилися роботи з розмінування, відновлення польової інфраструктури та вирівнювання пошкоджених ділянок, що вплинуло на швидкість відновлення землекористування. У результаті на одних ділянках спостерігається стабільне повернення до повноцінної обробки, тоді як інші залишаються непридатними через високий рівень небезпеки або деградацію ґрунтів [11].

Такий неоднорідний процес реабілітації агроландшафтів формує складну картину поствоєнних трансформацій, яку можливо коректно оцінити лише за рахунок комбінування ручних спостережень та автоматизованої класифікації. Застосований підхід дозволяє комплексно простежити як первинні руйнування, так і відновлювальні процеси, що відбуваються на території громади протягом кількох років після бойових дій.

У межах ручного аналізу було опрацьовано 1089 полігонів загальною площею 740,6 км². Із них:

- оброблених земель - 657,2 км² (88,74%),
- необроблених земель - 83,4 км² (11,26%).

Отриманий розподіл свідчить, що попри суттєвий вплив бойових дій, більша частина агроландшафтів громади вже відновлена і повернулася до використання або зберегла свою функціональність. Водночас понад 11% площі становлять ділянки, які не оброблялися протягом останніх років. Саме ця категорія земель має безпосередній зв'язок із зонами впливу воєнних дій, мінуванням, деградацією ґрунтів або руйнуванням польової інфраструктури.

Порівняння просторового розподілу необроблених полігонів із картою бойових дій (рис.3.7) свідчить про чітку локалізацію найбільших порушень у центральній та південно-східній частинах громади. Тут у 2022 році проходила лінія бойового зіткнення, що спричинило значні трансформації природних та антропогенних ландшафтів. Після деокупації окремі території залишалися

замінованими, мали значну кількість вирв, порушення структури мікрорельєфу або були непридатними до обробки з міркувань безпеки. Саме тому ділянки пошкоджених агроландшафтів найчастіше відображаються як необроблені поля як у ручному, так і в автоматичному аналізі.

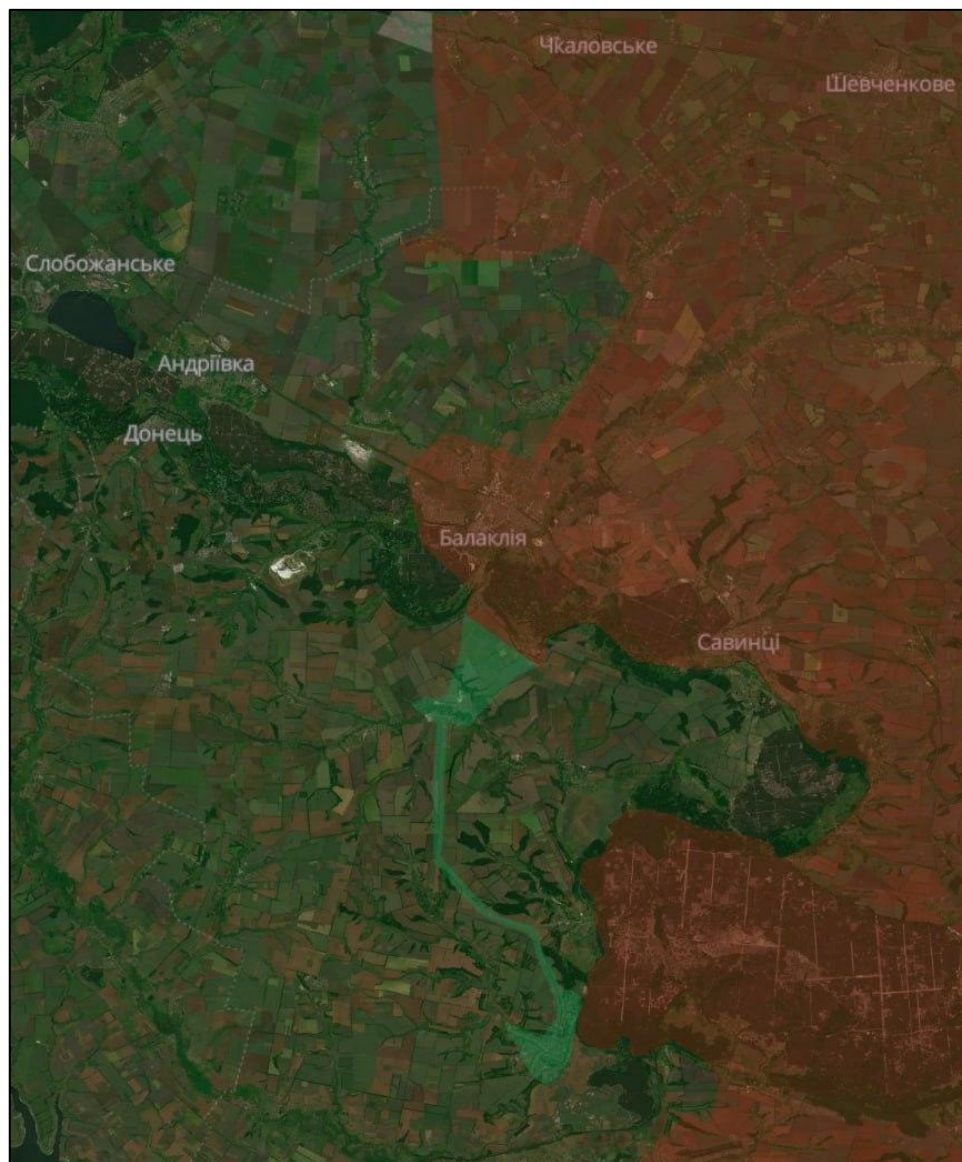


Рис.3.7. Період бойових дій на території Балаклійської громади, 30.06.2022 [50]

Результати автоматичної класифікації за весняний та осінній сезони 2025 року виявили високу кореляцію з ручним аналізом, підтвердивши сталість орних територій та послідовність землекористування. Автоматичні класифікації показали, що переважна частина оброблюваних полів зберігає однакову

конфігурацію у двох сезонах, що свідчить про відновлення сталого аграрного циклу.

Водночас об'єднаний аналіз двох сезонів дозволив детальніше виявити ділянки зі змішаними ознаками. У місцях активних бойових дій алгоритм інколи класифікував фрагменти полів як оброблені через спектральну подібність відкритого ґрунту до оранки. Однак ці значення не утворювали суцільних полігонів і трактувалися як статистичні помилки, а не свідчення реального використання полів. Такий підхід дозволяє уникнути переоцінювання ступеня відновлення земель.

Узагальнення отриманих картографічних матеріалів демонструє, що автоматична класифікація коректно визначає перепахані й стабільно оброблювані землі, підтверджуючи результати ручного аналізу на більшості територій. Водночас саме ручна інтерпретація залишається критично важливою для виявлення деградованих, забруднених або техногенно змінених ділянок, які алгоритми сприймають неоднозначно через неоднорідні спектральні характеристики поверхні.

Отже, поєднання ручного та автоматизованого аналізу дозволило комплексно оцінити вплив воєнних дій на агроландшафти Балаклійської громади.

Таким чином, воєнні дії справили суттєвий, але нерівномірний вплив на агроландшафти Балаклійської громади, а поєднання ГІС-аналізу та супутникового моніторингу дозволило кількісно та якісно оцінити масштаби цих трансформацій.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було розглянуто теоретико-методичну основу дослідження впливу воєнних дій на стан і динаміку ландшафтів Балаклійської громади та проаналізовано механізми їх просторових трансформацій у післявоєнний період. Особливу увагу приділено можливостям ГІС та методів ДЗЗ як ключових інструментів для дослідження територій із обмеженим доступом. Аналітичну базу сформували супутникові дані Sentinel-2, опрацьовані в середовищі Google Earth Engine, у поєднанні з просторовими засобами обробки та візуалізації платформи ArcGIS Pro. Проведена робота дозволяє зробити наступні висновки:

1. Розглянуто ландшафт як складну відкриту геосистему, здатну реагувати на зовнішні деструктивні чинники, серед яких війна виступає одним із найпотужніших за масштабом та інтенсивністю впливів. Аналіз теоретичних підходів показав, що воєнні процеси порушують структурно-функціональну організацію ландшафтів, змінюють їх морфологію, зумовлюють деградацію ґрунтово-рослинного покриву, порушують функціональне використання земель та впливають на напрямки їх подальшої еволюції. Визначено, що бойові дії спричиняють механічні руйнування поверхні (воронки, траншеї, техногенні вали), деградацію ґрунтів і рослинності, виникнення пожеж, хімічне забруднення, порушення мікрорельєфу та гідрологічних зв'язків. Значні території перетворюються на «сіру зону», що сягає 20-35 км вздовж лінії фронту через мінування та руйнування інфраструктури, що спричиняє деградацію ландшафтів та змінює функціональне використання земель.

2. Охарактеризовано природно-ландшафтні особливості Балаклійської громади та визначено її ландшафт як комплексну геосистему, придатну до формалізації засобами ГІС-аналізу. Розглянуто морфологічну структуру території, типи ґрунтів, співвідношення природних і агрокультурних компонентів, а також особливості їх просторової організації.

3. Підтверджено високу ефективність застосування ГІС і ДЗЗ для дослідження ландшафтних змін. Використання багатоспектральних знімків Sentinel-2 у поєднанні з інструментами Google Earth Engine та ArcGIS Pro дає можливість не лише оперативно виявляти порушення агроландшафтів, а й забезпечувати комплексний аналіз, моніторинг сезонної динаміки й верифікацію результатів.

4. Розроблено алгоритм автоматизованої обробки супутникових даних у середовищі Google Earth Engine, спрямований на виявлення порушень і необроблюваних територій. У межах алгоритму обґрунтовано оптимальні порогові значення спектральних індексів NDVI та BSI, які виявилися найбільш інформативними для діагностики відкритих ґрунтів, деградованих ділянок і оброблюваних агроландшафтів. Комбінація цих індексів дозволила сформувати трирівневу класифікацію та забезпечити високу точність розпізнавання оброблюваних земель у весняний та осінній сезони.

5. У результаті просторового аналізу, проведеного за допомогою автоматичних і напіваавтоматичних методів, було встановлено сучасний стан агроландшафтів Балаклійської громади. Загальна площа проаналізованих земель становила 740,6 км², із яких 88,74% визначені як оброблені, а 11,26% - як необроблені або такі, що зазнали впливу бойових дій. Просторове порівняння класифікацій весняного та осіннього сезонів дозволило виокремити стабільно порушені території, а також ділянки часткового відновлення. Встановлено, що необроблені землі тісно пов'язані з районами проходження лінії бойового зіткнення у 2022 році, мінування та деградаційних процесів, що підкреслює нерівномірність воєнного впливу на територію громади. Необроблені агроландшафти, виявлені в межах зон бойових дій, розглядаються як просторові маркери порушення ландшафтної структури громади.

6. На основі отриманих картографічних матеріалів підтверджено, що поєднання автоматизованої класифікації та ручного дешифрування забезпечує найбільш достовірний аналіз стану агроландшафтів. Автоматичний метод

ефективно визначає стабільно оброблювані поля, тоді як ручна інтерпретація є незамінною для виявлення деградованих, фрагментованих та техногенно змінених ділянок, які мають складний спектральний відгук і можуть бути хибно класифіковані алгоритмом. Таким чином, у дипломній роботі продемонстровано актуальність і доцільність комплексного дослідження впливу воєнних дій на ландшафти за допомогою ГІС та ДЗЗ. Отримані дані можуть бути інтегровані у програми відновлення та моніторингу агроландшафтів, планування розмінування, оцінки екологічних ризиків та аналітичних рішень для територіальних громад, що зазнали впливу воєнних дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агапова О., Лещенко В. Дослідження пожеж у лісах України внаслідок воєнних дій за даними дистанційного зондування Землі. Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. 2024. Вип. 40. С. 6–17. URL: <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2024-40-01>
2. Адміністративний устрій Харківської області – Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Адміністративний_ustriy_Harkivskoyi_oblasti
3. В Україні 23% території потенційно заміновані. Бабель. URL: <https://babel.ua/news/116149-v-ukrajini-12-teritoriy-potenciyno-zaminovani>
4. Вегетаційні індекси в сільському господарстві: NDVI, NDRE, MSAVI, NDMI - WEAGRO. WEAGRO. URL: <https://weagro.ua/blog/vegetacijni-indeksy-v-silskomu-gospodarstvi-ndvi-ndre-msavi-ndmi/>
5. Гарасим А., Кельм Н. Підрив греблі річки Ірпінь. Як росіян зупинила вода. Texty.org.ua. URL: <https://texty.org.ua/articles/106945/pidryv-hrebli-richky-irpin-yak-rosiyan-zupynyla-voda/>
6. Географічні карти та картографічний метод дослідження (1 том - Географічні карти) (2 том — Картографічний метод дослідження) / Т. В. Дудун, С. В. Тітова.// упоряд. С. В. Тітова. – К.,2017. – 150 с.
7. Географія. Харківська обласна військова адміністрація. URL: <https://kharkivoda.gov.ua/pro-oblast/heohrafiya>
8. Геоінформаційні технології в екології : Навчальний посібник / Пітак І.В., Негадайлов А.А., Масікевич Ю.Г., Пляцук Л.Д., Шапорев В.П., Моїсеєв В.Ф./– Чернівці:, 2012.– 273с.
9. Головна - Екодія. URL: <https://ecoaction.org.ua/>
10. Головний сайт для агрономів. Визначення NDVI посівів: названо переваги та недоліки різних методів. Superagronom.com. URL: <https://superagronom.com/news/17826-metodi-viznachennya-ndvi--nazvano-perevagi-ta-nedoliki>

11. Гуманітарне розмінування - це 24,5 роки. За рік після деокупації Балаклії сапери розмінували чверть територій громади// Суспільне Новини. – 2023. – URL: <https://suspilne.media/kharkiv/567965-gumanitarne-rozminuvanna-se-245-roki-za-rik-pisla-deokupacii-balaklii-saperi-rozminuvali-cvert-teritorij-gromadi/>
12. Дар'я Липська. Війна суттєво погіршила стан довкілля України: карта. ГЛАВКОМ. URL: <https://glavcom.ua/country/society/viyna-suttjevo-pogirshila-ekologiyu-ukrajini-karta-858532.html>
13. Два роки після деокупації: чим живе Балаклійська громада. Слобідський край. URL: <https://www.slk.kh.ua/oblast-online/balaklia/dva-roki-pisla-deokupacii-cim-zive-balaklijska-gromada.html>
14. День звільнення Балаклії: Як ЗСУ звільняли місто Балаклія - Суспільне Харків. URL: <https://suspilne.media/kharkiv/568105-zrada-mera-kativni-zagarnikiv-ta-oladki-dla-vizvoliteliv-hronika-okupacii-ta-zvilnenna-balaklii-na-harkivsini/>
15. Децентралізація в Україні. Децентралізація в Україні. URL: <https://decentralization.ua/newgromada/4637>
16. Дистанційне зондування Землі як науковий напрям: історія та значення в сучасному світі. Сторінки - Домашня сторінка. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/news/Pages/View.aspx?MessageID=3392>
17. Електронний атлас України // Інститут географії НАН України. URL: https://atlas.igu.org.ua/maps_elektron.html
18. Єдина в Україні екологічна система - SaveEcoBot. URL: <https://www.saveecobot.com/>
19. Звіт про екологічні загрози в Україні // EcoZagroza.gov.ua. URL: <https://ecozagroza.gov.ua/>

20. Індекс NDVI: як він робить життя агронома простішим / Agronom. — Електронний ресурс. URL: <https://www.agronom.com.ua/indeks-ndvi-yak-vin-robyt-zhyttya-agronoma-prostishym/>
21. Карта-схема територіальних громад та районів Харківської області – Балаклійська міська громада. URL: <http://karta-obl.association.kharkov.ua/kh-obl/iziumskyi-raion/balakliiska-miska-hromada>
22. Користувацький інтерфейс ArcGIS Pro—ArcGIS Pro | Документація. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/get-started/user-interface.htm>
23. Ландшафти України: фізико-географічне районування. URL: <https://geografiamozil2.jimdofree.com/головна/ландшафти-україни-фізико-географічне-районування/>
24. Ландшафти України: їх типологія і класифікація // Geografica.net.ua. URL: http://geografica.net.ua/publ/galuzi_geografiji/fizichna_geografija_ukrajini/landshafti_ukrajini_jikh_tipologija_i_klasifikacija/39-1-0-541
25. Ландшафтознавство : навчальний посібник для здобувачів вищої освіти спеціальності 103 «Науки про Землю» / Л.М. Шевчук., О.Л. Герасимчук, Л.А. Васільєва. – Електронні дані. – Житомир : Житомирська політехніка, 2024. – 138 с.
26. Лисогор І. Умеров лінія фронту в Україні наразі складає 3200 км активні бойові дії на 1200 км. LB.ua. URL: https://lb.ua/society/2024/02/25/600245_umierov_liniya_frontu_ukraini_narazi.html
27. Майбутнє Балаклії: як громада відновлюється та розвивається попри війну. Слобідський край. URL: <https://www.slk.kh.ua/oblast-online/balaklia/majbutne-balaklii-ak-gromada-vidnovluetsa-ta-rozvivaetsa-popri-vijnu.html>
28. Марюшко М. В., Пащенко Р. Е. Фрактальний аналіз космічних знімків Sentinel-2 для моніторингу сільськогосподарських культур.

- Radioelectronic and computer systems. 2020. № 4. С. 34–47. URL: <https://doi.org/10.32620/reks.2020.4.03>
29. На Харківщині трактор підірвався на вибуховому пристрої: постраждав водій // AgroReview. URL: <https://agoreview.com/content/roslyny/harkivshhyni-traktor-pidirvavsya-vybuhovomu-prystroyi/>
30. Науково-методичне забезпечення навчального процесу: Конспект лекцій з дисципліни «Геоінформаційні технології» для / укл.: Саржанов Б.О. - Суми, 2024. – 107 с.
31. Оверлейний аналіз. Географія. URL: https://geoknigi.com/book_view.php?id=618
32. Перша світова: війна нових технологій - BBC News Україна. BBC News Україна. URL: https://www.bbc.com/ukrainian/science/2014/07/140729_ww1_new_weapons_ug
33. Платформа – Google Earth Engine. Google Earth Engine. URL: <https://earthengine.google.com/platform/>
34. Поняття «Белігеративний ландшафт». Белігеративні ландшафти Середнього Побужжя. URL: https://blogbeligero1.blogspot.com/p/blog-page_11.html
35. Робочий зошит з основ дистанційного зондування Землі. Частина 3. Обробка та аналіз супутникових знімків на платформі Google Earth Engine / С. М. Бабійчук, О. В. Гордієнко, О. В. Томченко та ін. – Київ : Національний центр «Мала академія наук України», 2023. – 200 с.
36. Салімонич Л. Шість місяців і шість днів руїни: як у Балаклійській громаді відновлюють життя після окупації. Останні та актуальні новини України та світу, новини дня онлайн - Головна сторінка - - Україна Молода. URL: <https://umoloda.kyiv.ua/number/3941/188/187480>

37. Семеряга О.П. Класифікація та використання у туризмі белігеративних ландшафтів Дніпропетровської області / О.П. Семеряга // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. – Серія: Географія. – 2014. – № 1. – С. 168-175.
38. Сорокіна Л. Ю. , Голубцов О. Г. , Чехній В. М. , Батова Н. І. Методологія і методика середньомасштабного геоінформаційного картографування ландшафтів. Український географічний журнал. 2017. № 3. С. 10-20. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000837200>
39. Сорокіна Л. Ю. Геоінформаційне картографування ландшафтів України / Л. Ю. Сорокіна, Р. Ф. Зарудна, О. Г. Голубцов // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. - 2014. - Вип. 19. - С. 96-102. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pbgo_2014_19_23
40. Стратегія розвитку Балаклійської ТГ на 2024-2027 роки – Балаклійська МБА. Балаклійська МБА – офіційний сайт. URL: https://balakleyamer.gov.ua/?page_id=28417
41. Черлінка В. NDVI Та Стан Рослинності: Відповіді На Популярні Питання. EOS Data Analytics. URL: <https://eos.com/uk/blog/ndvi-pytannia-i-vidpovidi/>
42. Як воєнні дії впливають на клімат та чи заплатить росія за кліматичну шкоду // URSA Media. URL: <https://ursamedia.com.ua/novyny/yak-voyenni-diyi-vplyvayut-na-klimat-ta-chy-zaplatyt-rosiya-za-klimatychnu-shkodu/>
43. 1000 днів війни, які змінили Україну та світ: цифри, факти та історичні фото. Ми Україна. URL: <https://weukraine.tv/article/1000-dniv-vijni-jaki-zminili-ukrajinu-ta-svit-tsifri-fakti-ta-istorichni-foto/>
44. 20 кілометрів сірої зони. Лінія фронту стала розмитою / І. Кипібіда та ін. Texty.org.ua – статті та журналістика даних для людей. URL: <https://texty.org.ua/projects/115921/liniya-frontu/>
45. An Analysis of Bare Soil Occurrence in Arable Croplands for Remote Sensing Topsoil Applications / N. Mzid et al. Remote Sensing. 2021. Vol. 13, no. 3. P. 474. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13030474>

46. ArcGIS Web Application. IIS Windows Server. URL: <https://ua.imsma.org/portal/apps/webappviewer/index.html?id=814d2770d197474d8ad7e8014c0a275e&locale=uk>
47. Bare Soil Index - ClimateEngine.org Support. ClimateEngine.org Support. URL: <https://support.climateengine.org/article/179-bare-soil-index>
48. Compositing, Masking, and Mosaicking | Google Earth Engine | Google for Developers. Google for Developers. URL: https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/tutorial_api_05
49. Copernicus Emergency Management Service: Ukraine Crisis. URL: <https://emergency.copernicus.eu/>
50. DeepStateMap.Live — карта бойових дій в Україні // DeepStateMap. URL: <https://deepstatemap.live/#10/49.3993563/36.5721130>
51. Denysyk H. I., Kiziun A. H., Kanskyi V. S. The Belligerent Landscapes of Ukraine. Ukrainian geographical journal. 2023. Vol. 2023, no. 3. P. 23–34. URL: <https://doi.org/10.15407/ugz2023.03.023>
52. Desktop GIS Software | Mapping Analytics | ArcGIS Pro. GIS Software for Mapping and Spatial Analytics | Esri. URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
53. ee.Image.connectedComponents | Google Earth Engine | Google for Developers. Google for Developers. URL: <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-image-connectedcomponents>
54. ee.Image.reduceConnectedComponents | Google Earth Engine | Google for Developers. URL: <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-image-reduceconnectedcomponents>
55. ee.Image.selfMask | Google Earth Engine | Google for Developers. Google for Developers. URL: <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-image-selfmask>
56. Examples of environmental harm in Ukraine: Irpin Dam - CEOBS. URL: <https://ceobs.org/ukraine-damage-map-irpin-dam/>

57. Export.image.toDrive | Google Earth Engine | Google for Developers. Google for Developers. URL: <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/export-image-todrive>
58. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review / M. Amani et al. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. Vol. 13. P. 5326–5350. URL: <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.3021052>
59. Google Earth Engine | Google для розробників. URL-адреса: <https://developers.google.com/earth-engine>
60. Gorelick, N., et al. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
61. H. Tamiminia, B. Salehi, M. Mahdianpari, L. Quackenbush, S. Adeli, and B. Brisco, «Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review» ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens., vol. 164, pp. 152–170, Jun. 2020
62. Image Visualization | Google Earth Engine | Google for Developers. Google for Developers. URL: https://developers.google.com/earth-engine/guides/image_visualization
63. ImageCollection Reductions | Google Earth Engine | Google for Developers. Google for Developers. URL: https://developers.google.com/earthengine/guides/reducers_image_collection
64. ImageCollection Visualization | Google Earth Engine | Google for Developers. Google for Developers. URL: https://developers.google.com/earth-engine/guides/ic_visualization
65. In Ukraine, tackling mine action from all sides to make land safe again. UNDP. URL: <https://www.undp.org/european-union/stories/ukraine-tackling-mine-action-all-sides-make-land-safe-again>

66. Jiang, Z., et al., Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band, *Remote Sensing of Environment* (2008). URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>
67. Landscape. Education | National Geographic Society. URL: <https://education.nationalgeographic.org/resource/landscape/>
68. Lawrence M.J., Stemberger H.L., Zolderdo A.J. The effects of modern war and military activities on ecosystem structure and function. *Environmental Reviews*, 2015. URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/er-2015-0039>
69. Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*. 2004. Vol. 25, No. 12. P. 2365–2407. URL: 10.1080/0143116031000139863.
70. Lu D., Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28, no. 5. P. 823–870. URL: <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>
71. National-Scale In-Season Field Boundaries of Ukraine Using Remote Sensing - Scientific Data. *Nature*. URL: <https://www.nature.com/articles/s41597-025-05190-7>
72. Ribeiro, P.G.; Martins, G.C.; Gastauer, M.; da Silva Junior, E.C.; Santos, D.C.; Frois Caldeira Júnior, C.; Cavalcante, R.B.L.; dos Santos, D.S.; Carneiro, M.A.C.; Valadares, R.B.d.S.; et al. Spectral and Soil Quality Index for Monitoring Environmental Rehabilitation and Soil Carbon Stock in an Amazonian Sandstone Mine. *Sustainability* 2022, 14, 597. URL: <https://doi.org/10.3390/su14020597>
73. Sentinel-2 Mission – Copernicus Data Space Ecosystem // Copernicus Documentation. URL: <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>

74. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services / M. Drusch et al. Remote Sensing of Environment. 2012. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
75. Sentinel-2A Satellitesensor | Satellite Imaging Corp. URL: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/sentinel-2a/>
76. Solokha, M. et al. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. Land, 13 (10). URL: <https://doi.org/10.3390/land13101614>
77. United Nations Environment Programme (2022). The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review. Nairobi, Kenya. URL: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/40746>
78. War in Ukraine | Global Conflict Tracker. Global Conflict Tracker. URL: https://www.cfr.org/global-conflict-tracker/conflict/conflict-ukraine?utm_source
79. War in Ukraine: an overview of environmental impacts and consequences for human health / W. L. Filho et al. Frontiers. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-resource-management/articles/10.3389/fsrma.2024.1423444/full>