

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет землевпорядкування

ПОГОДЖЕНО
Декан факультету
землевпорядкування

_____ **Олександр ШЕВЧЕНКО**

« ____ » _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
землевпорядного проєктування

_____ **Антоніна МОСКАЛЕНКО**

« ____ » _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «Моніторинг лісових згарищ за даними дистанційного зондування
Землі в межах Кременського району Луганської області»**

Спеціальність «193 Геодезія та землеустрій»

Освітньо-професійна програма «Геодезія та землеустрій»

Гарант освітньої програми

д. геогр. н., професор

(науковий ступінь та вчене звання)

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи,**

Старший викладач

(науковий ступінь та вчене звання)

Консультант, д.с.н.

Виконав

_____ **Іван КОВАЛЬЧУК**

(підпис)

_____ **Богдан ДЕНИСЮК**

(підпис)

_____ **Анатолій ПОЛТАВЕЦЬ**

(підпис)

_____ **Владислав ПІКАЛЮК**

(підпис)

Київ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет землевпорядкування**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
геоінформатики та аерокосмічних
досліджень землі,
к.т.н., доцент

_____ **Антоніна МОСКАЛЕНКО**

« _____ » _____ р.

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ

Пікалюку Владиславу Віталійовичу

Спеціальність «193 Геодезія та землеустрій».

Освітньо-професійна програма «Геодезія та землеустрій».

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: «Моніторинг лісових згарищ за даними дистанційного зондування Землі в межах Кремінського району Луганської області» затверджена наказом від 27.11.2025 року № 2899 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру: за 10 днів до захисту.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: матеріали дистанційного зондування Землі, що включають хронологічні серії мультиспектральних космічних знімків супутників Sentinel-2, отримані через відкриті вебплатформи Copernicus Data Space Ecosystem. Методичні інструкції та рекомендовані практики міжнародної програми UN-SPIDER щодо картографування зон випаленої рослинності. Відомості Державного картографо-геодезичного фонду, а також картографічні матеріали базового лісовпорядкування та меж ДП «Кремінське лісомисливське господарство».

Камеральна обробка інформації, радіометрична нормалізація та просторово-часове ГІС-моделювання растрових масивів здійснені за допомогою геоінформаційної системи ArcGIS Pro.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Проаналізувати науково-теоретичні основи, а також вітчизняний та міжнародний досвід у сфері застосування ГІС-технологій та даних ДЗЗ для оцінки пірогенного ураження екосистем;

2. Обґрунтувати вибір вихідних спектральних каналів, спроектувати структуру бази геопросторових даних проєкту у форматі File Geodatabase та розробити технологічну схему попередньої обробки й маскуванню завад на растрових знімках;

3. Здійснити індексне моделювання (розрахунок вегетаційних індексів NBR, dNBR та водного індексу MNDWI), виконати порогову класифікацію ступенів деградації насаджень, провести векторизацію осередків згарищ та кількісно оцінити просторові втрати лісового фонду Кременського у динаміці за 2020–2024 роки.

Додатки.

Дата видачі завдання _____

Керівник бакалаврської

кваліфікаційної роботи _____ **Богдан ДЕНИСЮК**

Консультант д.е.н. _____ **Анатолій ПОЛТАВЕЦЬ**

Завдання взяв до виконання _____ **Владислав ПІКАЛЮК**

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг бакалаврської кваліфікаційної роботи становить 56 сторінок комп'ютерного тексту. Робота містить 3 таблиці та 30 рисунків. Список використаних джерел налічує 25 найменування.

Ключові слова: ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ, ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ, ЛІСОВІ ПОЖЕЖІ, ІНДЕКС dNBR, КРЕМІНСЬКИЙ РАЙОН, ARCGIS PRO, SENTINEL-2, ЕКОЛОГІЧНІ ЗБИТКИ, МОНІТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є дослідження просторово-часової динаміки пірогенного ураження лісових екосистем Кремінського району Луганської області внаслідок природних пожеж та бойових дій на основі сучасних технологій ГІС і дистанційного зондування Землі.

Об'єктом дослідження є процес просторово-часового моніторингу та картографування лісових згарищ за матеріалами космічної зйомки.

Предметом дослідження є методи, ГІС-інструменти та індексні моделі дистанційного зондування для детектування й класифікації ступенів пірогенного пошкодження лісових земель.

Методи дослідження: аналіз і синтез, картографічний метод, метод індексного моделювання (NBR, dNBR, MNDWI), порогова рекласифікація, просторово-часовий та картометричний аналіз.

До основних результатів дослідження належать такі:

- обґрунтовано високу ефективність і безпечність використання даних ДЗЗ як єдиного інструменту оцінки стану рослинного покриву в умовах активних бойових дій та щільного мінного забруднення території;
- спроектовано логічну структуру бази геопросторових даних проекту у форматі File Geodatabase в ArcGIS Pro та оптимізовано алгоритм

попередньої обробки й маскуванню завад (хмарності, води) на растрових серіях супутника Sentinel-2;

- проведено індексне моделювання та обґрунтовано оптимальний нижній поріг детектування ($dNBR = 0,270$) для виділення згарищ на ґрунтах;
- виконано порівняльний аналіз і розраховано площі втрат лісового фонду від природної пожежі 2020 року та кумулятивних воєнних руйнувань станом на липень 2024 року;
- сформовано пакет тематичних порівняльних карт-схем формату A3 для наочного відображення ступенів ураження насаджень.

Практичне значення роботи полягає у створенні точних цифрових моделей та картографічних матеріалів, які можуть використовуватися органами екологічного контролю для юридичної фіксації екоциду, розрахунку грошових збитків, а також під час розробки проєктів землеустрою щодо повоєнного відновлення та рекультивації порушених лісових земель.

ABSTRACT

The bachelor's qualification thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The total volume of the thesis is 56 pages of computer-typed text. The work contains 3 tables and 30 figures. The list of references includes 25 sources.

Keywords: REMOTE SENSING, GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, FOREST FIRES, $dNBR$ INDEX, KREMINNA DISTRICT, ARCGIS PRO, SENTINEL-2, ENVIRONMENTAL DAMAGE, LAND MONITORING.

The purpose of the bachelor's qualification thesis is to investigate the spatiotemporal dynamics of pyrogenic damage to forest ecosystems in the Kreminna district of the Luhansk region caused by natural fires and military operations using modern GIS and remote sensing technologies.

The object of the study is the process of spatiotemporal monitoring and mapping of forest burned areas based on satellite imagery.

The subject of the study is methods, GIS tools, and remote sensing index models for detecting and classifying degrees of pyrogenic damage to forest lands.

Research methods: analysis and synthesis, cartographic method, index modeling method (NBR, dNBR, MNDWI), threshold reclassification, spatiotemporal and cartometric analysis.

The main research results include the following:

- the high efficiency and safety of using remote sensing data as the only viable tool for assessing vegetation status under active combat operations and high landmine contamination risks were substantiated;
- the logical structure of the project's geospatial database was designed in the File Geodatabase format within ArcGIS Pro, and the preprocessing and noise masking pipeline (clouds, water body elimination) for Sentinel-2 satellite time series was optimized;
- index modeling was performed, and the optimal lower detection threshold ($dNBR = 0.270$) was justified for delineating burned areas on soils;
- a comparative analysis was conducted, calculating the exact areas of forest loss from the natural fire of 2020 and cumulative war-induced damage as of August 2024;
- a set of comparative thematic maps in A3 format was compiled to visualize the degrees of forest canopy damage.

The practical significance of the thesis lies in the creation of precise digital models and cartographic materials that can be applied by environmental inspection authorities to legally document ecocide, estimate financial losses, and design land management projects for postwar forest restoration and land reclamation.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ КАРТОГРАФУВАННЯ НАСЛІДКІВ ПОЖЕЖ.....	13
1.1. Аналіз предметної сфери щодо дослідження наслідків природних пожеж.....	13
1.2. Аналіз міжнародного та вітчизняного досвіду картографування пожеж та їх наслідків	16
1.3. Опис вихідних даних дослідження	17
РОЗДІЛ 2. Методика картографування наслідків пожеж	22
2.1. Опис методики картографування пожеж та їх наслідків.....	22
2.2. Концептуальна модель бази геопросторових даних для картографування наслідків пожеж.....	24
2.3. Опрацювання вихідних геопросторових даних проєкту.....	26
РОЗДІЛ 3. Дослідна реалізація картографування наслідків пожеж.....	31
3.1. Підготовка та опрацювання вихідних супутникових знімків лісових ресурсів Кременського району Луганської області	31
3.2. Виконання поліпшення супутникових знімків та виконання атмосферної корекції.....	32
3.3. Опрацювання різночасових супутникових знімків	34
3.4. Застосування індексу NBR для території Кременського району ...	36
3.5. Виконання класифікації супутникових знімків лісових ресурсів для виділення згарищ.....	43
3.6. Векторизація місць локалізації лісових згарищ Кременського району та оцінювання їх втрат.	45

3.7. Картографічне відображення результатів ГІС-моніторингу лісових згарищ.....	47
ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54

ВСТУП

Лісові екосистеми відіграють одну з найважливіших ролей у підтримці екологічного балансу, формуванні клімату та збереженні біорізноманіття. Для східних регіонів України, зокрема Луганської області, лісові масиви мають особливе значення, адже вони виконують водоохоронні, ґрунтозахисні та рекреаційні функції в умовах переважно степової зони. Одним із найцінніших лісових масивів цього регіону є Кременські ліси, які неодноразово піддавалися нищівному впливу пожеж.

Внаслідок бойових дій, починаючи з 2014 року та особливо після повномасштабного вторгнення, лісові ресурси Кременського району зазнали катастрофічних втрат. Вибухи боєприпасів, навмисні підпали та неможливість оперативного реагування підрозділів ДСНС призвели до виникнення масштабних лісових пожеж, які перетворили тисячі гектарів унікальних насаджень на згарища. За звичайних умов оцінка наслідків пожеж здійснюється шляхом наземних польових обстежень, однак в умовах активних бойових дій, щільного замінування територій та наявності нерозірваних боєприпасів традиційні методи моніторингу лісу є фізично неможливими і становлять пряму загрозу для життя фахівців. За таких обставин єдиним безпечним, оперативним та об'єктивним інструментом для оцінки масштабів знеліснення та екологічних збитків є використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС). Застосування методів просторового аналізу, обробки мультиспектральних супутникових знімків та розрахунку спеціалізованих вегетаційних індексів дозволяє не лише ідентифікувати межі згарищ, але й оцінити ступінь пошкодження деревостою. Саме тому дослідження, спрямоване на розробку та застосування методики картографування наслідків пожеж у Кременському районі на основі ДЗЗ, є вкрай актуальним і має високу наукову та практичну значущість для майбутнього повоєнного відновлення територій та раціонального управління земельними ресурсами.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є дослідження просторово-часової динаміки пірогенного ураження лісових екосистем Кременського району Луганської області внаслідок природних пожеж та бойових дій на основі сучасних технологій ГІС і дистанційного зондування Землі.

Об'єктом дослідження є процес просторово-часового моніторингу та картографування лісових згарищ за матеріалами космічної зйомки.

Предметом дослідження є методи, ГІС-інструменти та індексні моделі дистанційного зондування для детектування й класифікації ступенів пірогенного пошкодження лісових земель.

Завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи:

- проаналізувати теоретико-методичні засади та міжнародний досвід застосування технологій ГІС і даних ДЗЗ для моніторингу лісових пожеж;
- обґрунтувати вибір вихідних спектральних каналів космічних знімків супутника Sentinel-2 та оптимізувати алгоритм їхньої попередньої обробки;
- спроектувати структуру бази геопросторових даних проєкту у форматі File Geodatabase в ArcGIS Pro;
- здійснити індексне моделювання (розрахунок растрових моделей NBR, dNBR та MNDWI) й обґрунтувати порогові значення для точного виділення згарищ;

виконати картографування осередків ураження та кількісно оцінити просторові втрати лісового фонду Кременського району та заказника «Серебрянський» у динаміці за 2020–2024 роки.

Методи дослідження:

аналіз і синтез – для опрацювання науково-теоретичних джерел, методичних рекомендацій та міжнародних практик моніторингу пожеж, метод індексного моделювання – для розрахунку спектральних вегетаційних та водних індексів за растровими масивами, порогова рекласифікація та картометричний

аналіз – для автоматизованого виділення ступенів пошкодження лісу та точного обчислення площ втрат у гектарах, картографічний метод – для розробки порівняльних тематичних карт-схем та формування фінального компонування результатів дослідження в ArcGIS Pro.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ КАРТОГРАФУВАННЯ НАСЛІДКІВ ПОЖЕЖ

1.1. Аналіз предметної сфери щодо дослідження наслідків природних пожеж

Лісові пожежі це стихійне, некероване поширення вогню лісовими площами, що призводить до часткового або повного руйнування біоценозів[3]. Наслідки пожеж руйнують екологічну, економічну та соціальну сфери. З екологічної точки зору, лісові пожежі завдають шкоди всім компонентам природних екосистем. Під час згоряння біомаси відбувається масштабне забруднення атмосферного повітря продуктами горіння - твердими суспендованими частками (аерозолями), чадним газом, оксидами азоту та леткими органічними сполуками. Це не лише погіршує якість повітря на локальному рівні, але й вносить значний вклад у глобальні зміни клімату через масштабні викиди діоксиду вуглецю. За даними досліджень, динаміка викидів CO₂ внаслідок лісових пожеж в Україні демонструє тривожні тенденції: якщо в період 2003-2023 років загальний тижневий обсяг викидів становив близько 6 мегатонн, то у 2024 році цей показник різко зріс до 8 мегатонн, досягаючи в окремі пікові тижні осені 0,7 мегатонн. Зростання концентрації парникових газів також супроводжується виснаженням озонового шару Землі[6].

Окремо слід розглянути деградацію ґрунтів та водних ресурсів району. Пожежі викликають глибоке пошкодження та деградацію ґрунтів. Високі температури руйнують органічну частину ґрунту (гумус), порушують його мікробіологічну активність та змінюють фізико-хімічні властивості[6]. Оголений після пожежі ґрунт втрачає здатність затримувати вологу, що призводить до різкого зниження водорегулюючої та протиерозійної ролі лісу. Внаслідок цього активізуються процеси вітрової та водної ерозії, що є особливо критичним для Кременського району, значна частина якого лежить на Боровій терасі річки Сіверський Донець, де переважають супіщані та піщані ґрунти.

Знищення рослинного покриву сприяє зсуву пісків та опустелюванню територій. Крім того, зола та незгорілі залишки змиваються поверхневими стоками, спричиняючи забруднення поверхневих і підземних вод, порушуючи гідрохімічний баланс водойм (таких як озера Черникове, Попове, Підпісочне та інші гідрологічні об'єкти району) [6].

Втрата біорізноманіття є ще одним прямим і найбільш тривалим наслідком лісових пожеж. Загибель флори та фауни порушує трофічні ланцюги. Кременські ліси історично слугували середовищем існування для багатьох видів тварин (кабани, лосі, олені, лисиці) і налічували безліч об'єктів природно-заповідного фонду, серед яких гідрологічні та ботанічні заказники («Кременські каптажі», «Серебрянський»), заповідні урочища («Дубовий гай», «Вільшаник»)[7]. Пожежі перетворюють ці багаті екосистеми на гомогенні згарища, процес сукцесії (відновлення) яких може тривати десятиліттями.

Статистика пожеж на території України вказує на стійку тенденцію до зростання площ ураження. У період з 2000 по 2020 рік було пошкоджено близько 51,4 тис. га лісових насаджень[1]. Однак, лише за період з кінця вересня до початку жовтня 2020 року на території Луганської області виникла серія катастрофічних пожеж, які поширилися на понад 20 тисяч гектарів, забравши життя 11 людей та пошкодивши сотні будинків[8]. Найбільш постраждали Новоайдарське (9529,6 га), Сєверодонецьке (7552,0 га), Станично-Луганське (2952,0 га) та безпосередньо Кременське (580,0 га) лісомисливські господарства[9].

Починаючи з 2022 року, парадигма виникнення пожеж кардинально змінилася. Основним тригером стала збройна агресія та інтенсивні бойові дії. За даними Державної екологічної інспекції, станом на 2023 рік в Україні уражено бойовими діями та пожежами понад 3 мільйони гектарів лісів, що становить майже третину від усього лісового фонду держави[10]. Зона бойових дій охопила 900 об'єктів природно-заповідного фонду загальною площею 1,24 млн га. Кременський район, і зокрема Серебрянський ліс, опинився безпосередньо на лінії фронту. Пожежі тут спричиняються щоденними

артилерійськими обстрілами, використанням фосфорних боєприпасів та дронів-запалювачів, що призводить до суцільного вигорання деревостанів та неможливості проведення будь-яких заходів з пожежогасіння.

Економічні наслідки таких руйнувань є колосальними. За офіційною інформацією Державного агентства лісових ресурсів України, станом на осінь 2024 року загальний обрахований розмір шкоди та збитків лише на доступних (деокупованих) територіях внаслідок лісових пожеж і бойових дій становив понад 8,151 мільярда гривень. Оскільки більша частина лісів Кременщини перебуває в зоні активних бойових дій або під окупацією, проведення прямого економічного оцінювання та обліку втрат наземними методами є неможливим[11].

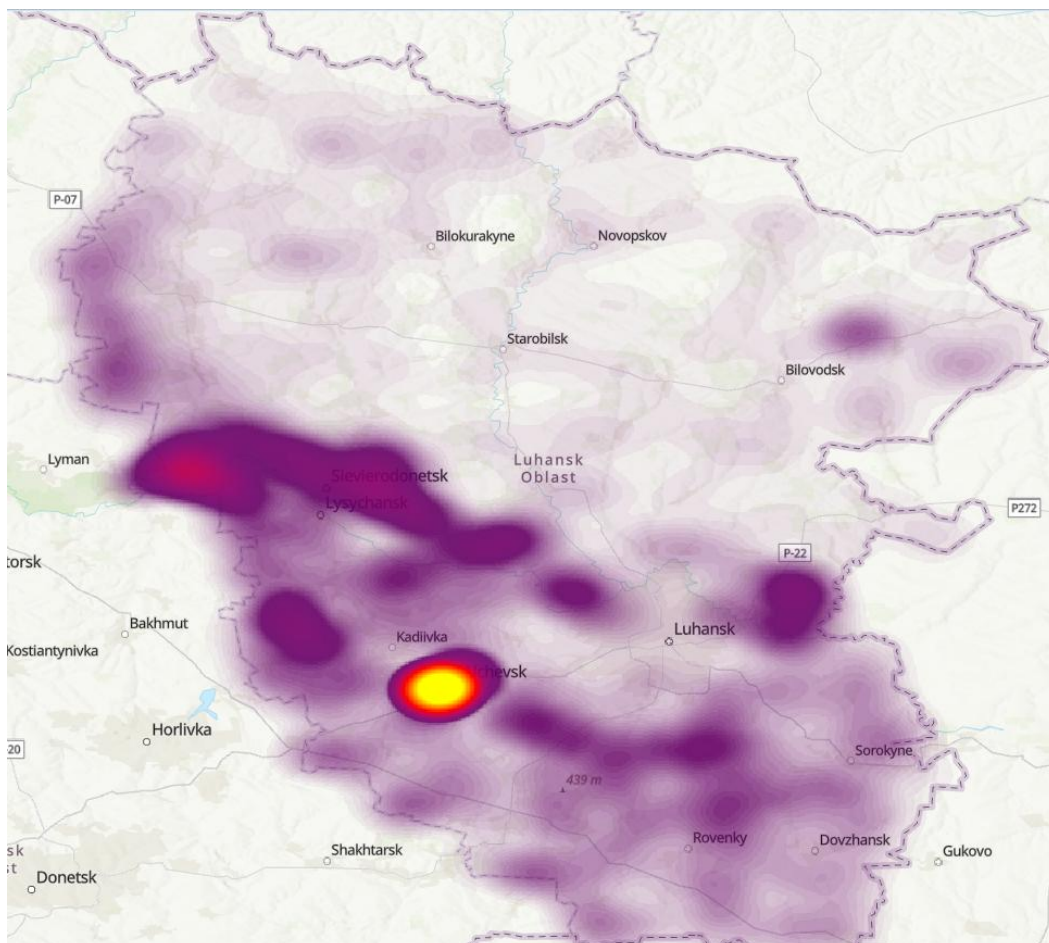


Рис. 1.1 Картосхема локалізації найбільших осередків лісових пожеж на території Луганської області за період 2020-2024 років

1.2. Аналіз міжнародного та вітчизняного досвіду картографування пожеж та їх наслідків

На європейському рівні найбільш комплексною та методологічно досконалою є Європейська інформаційна система щодо лісових пожеж (European Forest Fire Information System - EFFIS)[12]. Створена у 1998 році та підтримувана мережею експертів із 43 країн, у 2015 році EFFIS стала невід'ємною частиною сервісів управління надзвичайними ситуаціями в рамках програми Європейського Союзу Copernicus (Copernicus Emergency Management Services)[13]. Модульна структура EFFIS охоплює повний цикл менеджменту пожеж: від превентивного оцінювання небезпеки до аналізу довгострокових наслідків. Вона включає п'ять ключових модулів: оцінювання пожежної небезпеки (Fire Danger Assessment), швидке оцінювання пошкоджень (Rapid Damage Assessment), оцінювання викидів і дисперсії диму (Emissions Assessment and Smoke Dispersion), оцінювання потенційних втрат ґрунту (Potential Soil Loss Assessment) та моніторинг відновлення рослинності (Vegetation Regeneration)[12].

На глобальному рівні діє ініціатива Організації Об'єднаних Націй - Програма UN-SPIDER (Платформа ООН для отримання космічної інформації щодо попередження та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій). Ця структура розробила спеціалізовані «Рекомендовані практики» (Recommended Practices), серед яких чільне місце посідає методика картографування ступеня вигорання (Burn Severity Mapping Recommended Practice). Методологія UN-SPIDER чітко регламентує використання відкритих оптичних даних місій Sentinel-2 та Landsat 8/9 для обчислення нормалізованих індексів, з покроковими інструкціями щодо застосування відкритого програмного забезпечення, такого як QGIS, та класифікації результатів за стандартами Геологічної служби США (USGS)[14].

Вітчизняний досвід моніторингу лісових пожеж також демонструє високий науково-технічний рівень, адаптований до специфіки українських

екосистем. Дослідження, проведені в Інституті космічних досліджень НАН України та ДКА України, зосереджені на розробленні інформаційних технологій оцінювання пожежної небезпеки з високим просторовим розрізненням. Українськими вченими розроблено покращений індекс пожежної небезпеки (FWIimpr), який на відміну від стандартних європейських продуктів, інтегрує не лише метеорологічні дані, а й супутникову інформацію щодо вологості поверхневого шару ґрунту[5]. Це дозволяє формувати карти небезпеки з просторовим розрізненням 250 метрів замість традиційних 8-10 км.

Досягненням вітчизняної науки є обґрунтування можливості гармонізації даних різних супутникових платформ. Дослідження показали, що мультиспектральні дані Sentinel-2 MSI є спектрально порівнянними з даними Landsat 8 OLI, із значеннями середньоквадратичного відхилення (RMSD) від 0,0121 до 0,0398[15]. Це відкриває шлях до побудови безперервних і щільних часових рядів спостережень, що критично важливо для території України, де часто спостерігається інтенсивна хмарність. Для моніторингу масових лісових пожеж в зоні бойових дій (включаючи Кременські ліси) ефективно застосовуються дані сенсора VIIRS (просторова розрізненість 375 м), які, незважаючи на низьку просторову деталізацію, дозволяють щоденно фіксувати теплові сигнатури від артилерійських розривів та масштабних загорянь на територіях, куди доступ заборонений або ускладнений. Проте для точної оцінки площ та підрахунку збитків необхідне застосування детальніших даних, які будуть розглянуті в наступному підрозділі[10].

1.3. Опис вихідних даних дослідження

Успіх методології картографування лісових згарищ та достовірність отриманих результатів фундаментально залежать від коректного вибору вихідних даних дистанційного зондування.

Система Sentinel-2 складається з двох ідентичних супутників (Sentinel-2A та Sentinel-2B), виведених на сонячно-синхронну орбіту, які рухаються з фазовим зсувом у 180 градусів. Це забезпечує унікальну частоту повторного

знімання тієї самої ділянки земної поверхні кожні 5 діб на екваторі, і ще частіше у середніх широтах (2-3 доби), що робить ці дані ідеальними для моніторингу таких динамічних явищ, як лісові пожежі та їх наслідки[17].

На борту супутників розміщено сучасний мультиспектральний оптико-електронний сенсор MSI (MultiSpectral Imager), що працює за принципом сканування (push-broom). Сенсор здійснює знімання у 13 спектральних каналах (від видимого до короткохвильового інфрачервоного діапазонів), які мають різну просторову роздільну здатність залежно від їхнього призначення: 10, 20 та 60 метрів на піксель[19].

Для задач картографування згарищ Кременського району та Серебрянського лісництва використовувався такий набір спектральних каналів:

1. Канали видимого діапазону (Band 2 - Синій, Band 3 - Зелений, Band 4 - Червоний) із просторовою роздільною здатністю 10 метрів. Ці канали необхідні для створення композитних зображень у природних кольорах (True Color Composite), що дозволяє візуально ідентифікувати задимлення, обриси активного фронту полум'я та загальну географічну ситуацію.
2. Канали ближнього інфрачервоного діапазону (NIR). Канал Band 8 (широкий NIR, 842 нм) з роздільною здатністю 10 метрів та канал Band 8A (вузький NIR, 865 нм) з роздільною здатністю 20 метрів. Вони є індикаторами життєздатності клітинної структури рослин та вмісту хлорофілу.
3. Канали короткохвильового інфрачервоного діапазону (SWIR). Канал Band 11 (1610 нм) та канал Band 12 (2190 нм), що мають просторову роздільну здатність 20 метрів. Канал 12 є фундаментальним для розрахунку індексів вигорання, оскільки він надзвичайно чутливий до зменшення вмісту вологи та присутності золи і мінерального ґрунту на поверхні згарищ.
4. Додаткові атмосферні канали (Band 1, Band 9, Band 10) з роздільною здатністю 60 метрів. Вони не використовуються безпосередньо для

класифікації лісів, але є критично важливими для роботи алгоритмів маскування хмар та розрахунку параметрів атмосферної корекції (Aerosol Optical Thickness та Water Vapour) [20].

Відбір космічних знімків здійснювався з використанням офіційного європейського порталу Copernicus Data Space Ecosystem. Формування вибірки даних відбувалося за двома часовими векторами[24]:

Перший вектор стосувався вивчення наслідків масштабних пожеж, не пов'язаних безпосередньо із бойовими діями, що вирували восени 2020 року на великих площах Кременського та Новоайдарського районів. Для цього було відібрано пару знімків: один за вересень 2020 року (до пожежі, еталонний стан) та другий за кінець жовтня 2020 року (після проходження вогню).

Другий вектор аналізу стосувався безпрецедентного екоциду, спричиненого артилерійськими обстрілами під час повномасштабного вторгнення. З огляду на перманентний характер бойових дій та постійну наявність диму й хмарності, використовувалися не поодинокі знімки, а часові медіанні композити (Median Composites) за липень 2022, 2023 та 2024 років. Еталонним до-пожежним знімком для цієї серії виступав безхмарний композит літа 2021 року.

Варто зазначити, що використання термально-модифікованих індексів (зокрема NBRT), які вимагають залучення теплових каналів супутникових платформ Landsat 8/9, було визнано недоцільним для умов Кременського району. Нижча просторова роздільна здатність термального сенсора TIRS (100 метрів з укрупненням до 30 метрів у продуктах Level-2), а також низька періодичність зйомки (один раз на 8–16 днів) не дозволяють чітко фіксувати дрібноконтурні та динамічні осередки воєнних руйнувань лісового намету. З огляду на це, моніторинг було повністю зорієнтовано на використання оптико-електронного сенсора MSI місії Sentinel-2. Процедура поєднання його каналів з різною роздільною здатністю (10 та 20 метрів) здійснювалася безпосередньо в ArcGIS Pro шляхом просторового перерахунку (resampling) каналів Band 11 та Band 12 до базового пікселя 10x10 метрів, що забезпечило максимальну картометричну

точність дослідження без залучення сторонніх систем. Порівняльні технічні характеристики спектральних каналів космічних місій Landsat 8/9 та Sentinel-2 наведено в Таблиця 1.1

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика спектральних каналів місій Landsat 8/9 та Sentinel-2, оптимізованих для моніторингу пожеж

Характеристика	Landsat 8 / 9	Sentinel-2 (A/B)
Сенсор	OLI (Оптика) + TIRS (Тепловий)	MSI (Мультиспектральний)
Кількість каналів	11	13
Характеристика	Landsat 8 / 9	Sentinel-2 (A/B)
Ближній інфрачервоний (NIR)	Band 5 (0,85-0,88 мкм), 30 м	Band 8 (0,78-0,90 мкм), 10 м
Короткохвильовий інфрачервоний (SWIR 1)	Band 6 (1,57-1,65 мкм), 30 м	Band 11 (1,56-1,65 мкм), 20 м
Короткохвильовий інфрачервоний (SWIR 2)	Band 7 (2,11-2,29 мкм), 30 м	Band 12 (2,10-2,28 мкм), 20 м
Термальний інфрачервоний (Thermal)	Band 10 (10,6-11,19 мкм), 100 м*	Відсутній
Періодичність зйомки (ревізит)	16 днів (8 днів при використанні двох супутників)	5 днів (2-3 дні в середніх широтах)

Висновок до розділу 1: Аналіз теоретичної бази та міжнародного досвіду показав, що лісові пожежі завдають комплексної шкоди екологічній, економічній та соціальній сферам, а в умовах активних бойових дій традиційні наземні методи моніторингу є фізично неможливими. Провідні міжнародні

системи (EFFIS, UN-SPIDER) та вітчизняні наукові розробки підтверджують, що дані ДЗЗ - зокрема мультиспектральні знімки Sentinel-2 - є єдиним безпечним і ефективним інструментом оцінки пірогенних уражень на замінованих та окупованих територіях. Вибір місії Sentinel-2 як основного джерела даних обґрунтовано її високою просторовою роздільною здатністю (10–20 м) та частотою повторного знімання (2–5 діб), що критично важливо для динамічного моніторингу лісових ресурсів Кременського району.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА КАРТОГРАФУВАННЯ НАСЛІДКІВ ПОЖЕЖ

2.1. Опис методики картографування пожеж та їх наслідків

З огляду на проаналізовані міжнародні та вітчизняні практики, у цьому дослідженні було обрано комплексний підхід, що поєднує переваги відкритих супутникових даних високої просторової роздільної здатності (місія Sentinel-2) та потужних аналітичних інструментів настільної ГІС-платформи ArcGIS Pro. Такий підхід дозволяє виконувати високоточний попиксельний просторовий аналіз, класифікацію та картографування лісових екосистем безпосередньо на локальній робочій станції.

Методика дослідження ґрунтується на використанні сучасних геоінформаційних технологій, методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та індексного аналізу растрових даних. Це забезпечує можливість безпечно, оперативно та кількісно оцінювати наслідки як природних пожеж, так і руйнувань внаслідок бойових дій.

Загальний методологічний алгоритм роботи включає такі послідовні етапи:

Для реалізації всіх етапів просторового аналізу та фінального картографування було обрано:

ArcGIS Pro - як основне інженерне ГІС-середовище для опрацювання растрових матриць, виконання алгебри карт, векторизації, просторового аналізу та створення картографічних компонувань[18].

У якості вихідних джерел інформації інтегровано:

Супутникові знімки Sentinel-2 MSI (рівень обробки Level-2A) - оптичні продукти, скориговані за атмосферою (BOA reflectance), що забезпечують роздільну здатність 10-20 метрів.

Просторова локалізація та оптимізація дослідження

Визначення точних меж області дослідження (ROI) шляхом імпорту офіційного векторного контуру Кременського району та виконання операції просторового обрізання растрових знімків тайлу T37UDQ. Це дозволило

оптимізувати обчислювальні ресурси комп'ютера та підвищити швидкість обробки даних.

Попереднє опрацювання та маскування завад

Виконання просторового вирівнювання каналів до єдиного пікселя 10x10 метрів. Створення бінарних масок на основі шару класифікації сцени *Scene Classification Layer (SCL)* процесора Sen2Cor для повного виключення з розрахунків пікселів хмарності, тіней та задимлення.

Проведення порівняльного аналізу стану лісового масиву до та після пірогенного впливу за допомогою розрахунку спектральних індексів в інструменті *Raster Calculator*:

NBR (Normalized Burn Ratio) - для фіксації базового стану рослинності та вмісту вологи в кронах у конкретні часові зрізи (2020, 2022, 2023, 2024 рр.).

dNBR (Delta Normalized Burn Ratio) - диференційний індекс, що відображає чисту просторово-часову динаміку руйнування біомаси через попиксельне віднімання після-пожежних растрів від довоєнного еталону

Порогова класифікація та картографування змін

Трансформація безперервних значень індексу dNBR у дискретні категорії за допомогою інструменту **Reclassify**. Весь масив даних диференційовано за адаптованими порогами USGS на три основні цільові класи стану лісу: низький, середній та високий (суцільне згарище) ступені пошкодження.

Векторизація та геометрична фільтрація результатів

Конвертація класифікованих растрових моделей у векторний формат полігонів (*Raster to Polygon*) із попереднім очищенням від дрібнопиксельного шуму через просторовий фільтр більшості (*Majority Filter*). Вилучення артефактів площею менше 0.1 га для формування чистої бази даних геометричних контурів згарищ.

Кількісний аналіз та інтерпретація

Точне обчислення площ уражених лісів у гектарах за допомогою інструменту **Calculate Geometry** за точним геодезичним методом (*Area geodesic*).

Просторове накладання (*Intersect*) отриманих векторних контурів згарищ на межі Серебрянського ботанічного заказника та квартальну сітку для оцінки реальних екологічних втрат.

Інтеграція результатів у фінальні тематичні карти-схеми формату А3 для документування збитків довкіллю.

2.2. Концептуальна модель бази геопросторових даних для картографування наслідків пожеж.

У межах роботи база даних проєкту реалізована у форматі файлової бази геоданих (File Geodatabase) ArcGIS Pro.

Просторові дані всередині бази геоданих структуровано за тематичним та функціональним принципами. Для коректного визначення метричних параметрів пошкоджених ділянок (зокрема, площі у гектарах) та ліквідації спотворень при просторовому аналізі, всі набори класів векторних об'єктів та растрові шари приведені до єдиної картографічної проєкції - WGS 1984 / UTM Zone 37N.

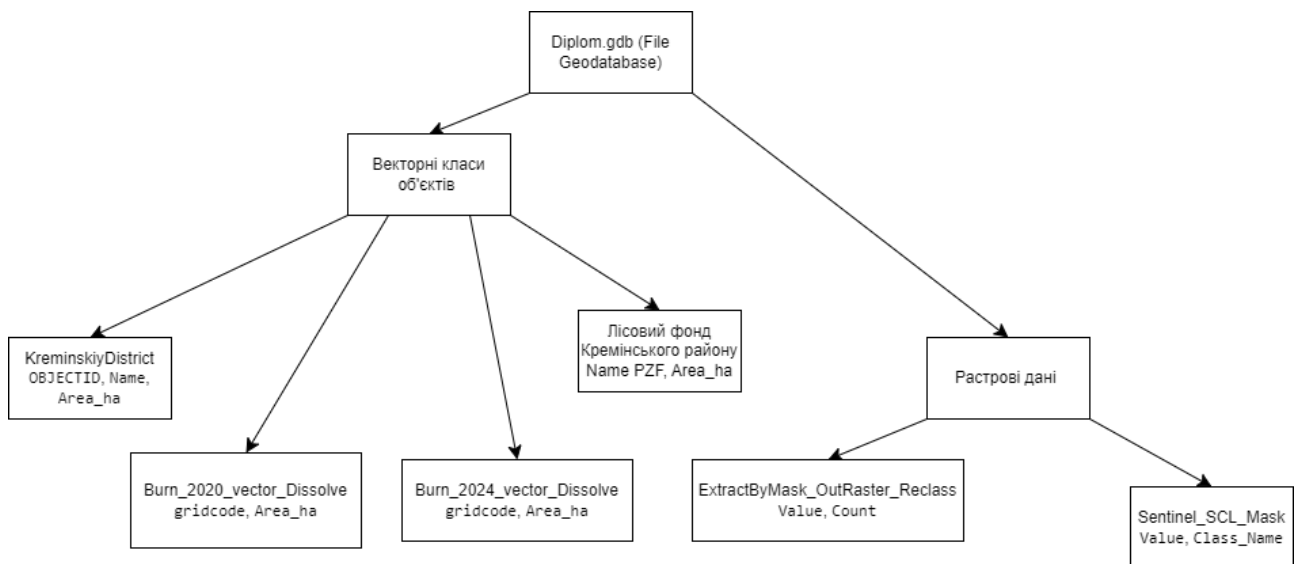


Рис. 2.1 UML-діаграма логічної структури розробленої бази геопросторових даних проєкту

Логічну структуру сформованої бази геопросторових даних, типи атрибутивних полів та їхнє цільове призначення наведено в Таблиця 2.1.

Таблиця 2.1

Структура та атрибутивне наповнення бази геопросторових даних

Назва шару	Тип геометрії	Ключові атрибути	Опис та призначення
KreminskiyDistrict	Полігон	OBJECTID, Name, Area_ha	Адміністративні межі Кремінського району, базова просторова основа проекту
Лісовий фонд Кремінського району	Полігон	Status, Area_ha	Межі лісового фонду
Sentinel2_2020_09 Sentinel2_2020_10	Растр	Value, RGB	Мультиспектральні супутникові знімки Sentinel-2
Sentinel2_2021_2023	Растр	Name, Date, Raster	Каталог супутникових знімків за 2021-2023 рр.
Sentinel2_2024_08	Растр	Value, RGB	Супутниковий знімок за липень 2024 р
Burn_2020_vector_Dissolve	Полігон	gridcode, Shape_Area , Area_ha	Контури згарищ природної пожежі 2020 року за ступенем пошкодження

Burn_2024_vector_Dissolve	Полігон	gridcode, Shape_Area , Area_ha	Кумулятивні згарища станом на липень 2024 року (наслідки бойових дій)
ExtractByMask_OutRaster_Recla ss	Растр	Value, Count	Рекласифікований растр dNBR, обрізаний за маскою досліджуваної території
Sentinel_SCL_Mask	Растр	Value, Class_Nam e	Маска хмарності та завад на основі Scene Classification Layer

2.3. Опрацювання вихідних геопросторових даних проєкту.

Для виконання моніторингу лісових згарищ у межах Кремінського району Луганської області було здійснено підготовку та опрацювання вихідних геопросторових даних. Використання дистанційних методів спостереження дозволяє отримувати актуальну інформацію про стан територій навіть за умов обмеженого доступу до них, що особливо важливо для районів, які перебували в зоні активних бойових дій.

На початковому етапі було визначено межі території дослідження. Об'єктом моніторингу обрано Кремінський район Луганської області, який характеризується значною часткою лісових масивів та високим рівнем антропогенного навантаження внаслідок військових дій. Територія району

охоплює як лісові насадження, так і сільськогосподарські землі, населені пункти та природні ландшафти.

Для просторової прив'язки всіх подальших матеріалів була використана карта адміністративних меж району. Вона дозволила визначити територіальні межі та забезпечити співставлення отриманих результатів із фактичним розташуванням досліджуваних об'єктів.



Рис. 2.2 Територія дослідження в межах Кременського району Луганської області

Після визначення меж дослідження було виконано збір та аналіз відкритих космічних знімків, отриманих з мультиспектрального сенсора MSI супутника Sentinel-2 (ESA). Супутникові дані є одним із найбільш ефективних інструментів моніторингу стану природних ресурсів, оскільки дозволяють оперативно оцінювати масштаби змін на великих територіях.

Пошук здійснювався через вебплатформу Copernicus Browser за такими критеріями:

- Повне покриття території Кременського лісового масиву (в межах колишнього Кременського району Луганської області).
- Максимальний поріг хмарності на момент зйомки - не більше 10%.
- Для моніторингу динаміки руйнувань та відновлення лісу сформовано серію знімків:

Вересень - жовтень 2020 року - для фіксації вихідного стану лісового фонду та наслідків локальної природної пожежі.

Період 2021 - 2023 років - проміжні моніторингові зрізи для відстеження природного відновлення та перших фаз бойових дій.

Липень 2024 року - фінальний зріз для оцінки кумулятивних (накопичених) збитків лісового масиву.

Для дослідження використовувалися супутникові зображення, що відображають сучасний стан території Кременського району. Під час візуального дешифрування особлива увага приділялася ділянкам зі зміненним кольоровим тоном та структурою поверхні. Такі зміни можуть свідчити про втрату рослинного покриву, пошкодження лісових насаджень, виникнення пожеж або інші процеси деградації природного середовища.

На супутникових знімках території Кременського району чітко простежуються значні площі земель із характерним буро-сірим забарвленням. У порівнянні з ділянками, вкритими здоровою рослинністю, такі території мають меншу інтенсивність зеленого кольору та неоднорідну текстуру поверхні. Подібні ознаки є характерними для згарищ і територій, які зазнали значного впливу високих температур.

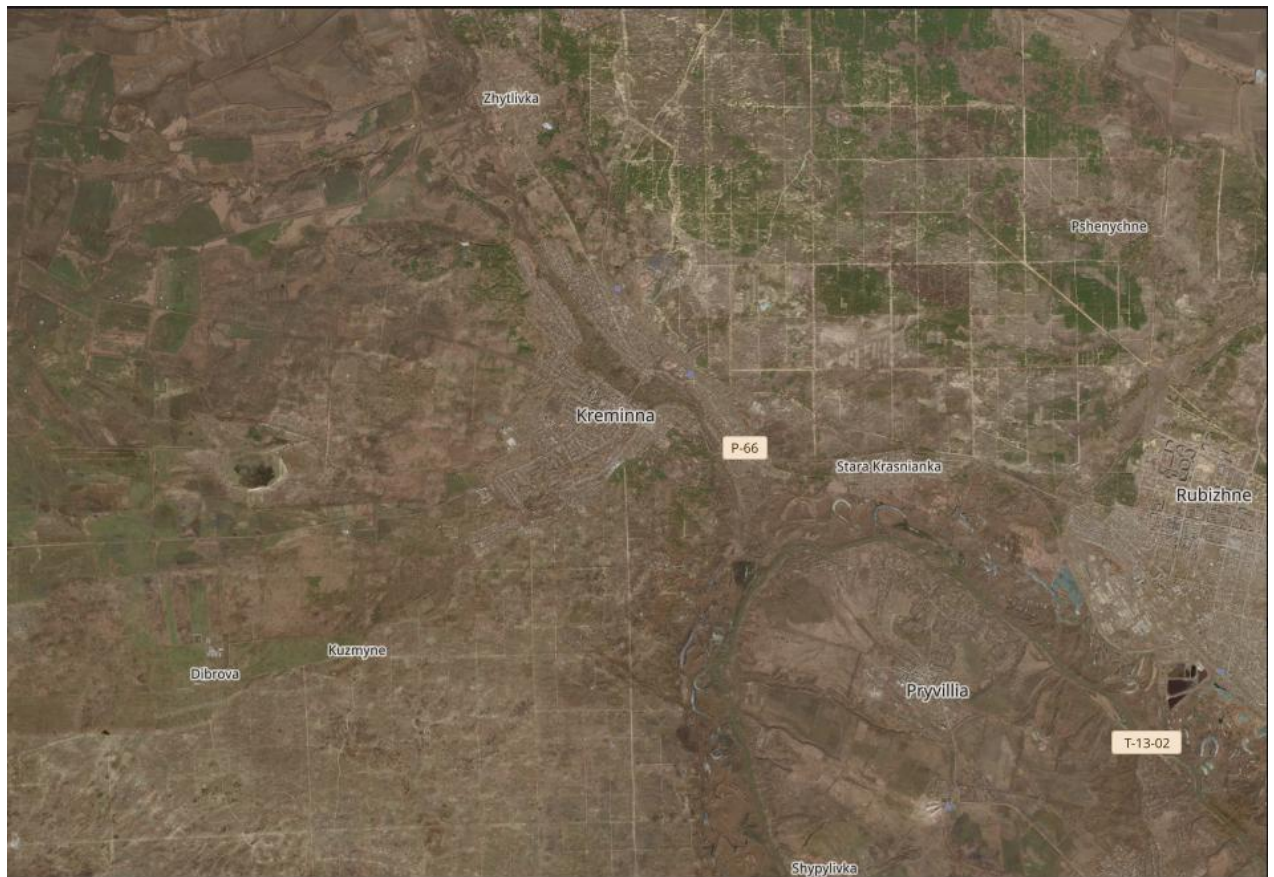


Рис. 2.3 Супутникове зображення території Кременського району із наслідками пожеж та пошкодженням рослинного покриву

На супутниковому знімку території Кременського району спостерігаються суттєві зміни стану земної поверхні. Найбільш помітною особливістю є значні площі земель із буро-сірим та темно-коричневим відтінком, які контрастують із ділянками збереженої рослинності. Такі спектральні характеристики є типовими для територій, що зазнали впливу пожеж або втратили значну частину рослинного покриву.

Загалом вихідні геопросторові дані представлені двома основними типами інформації: векторними даними адміністративних меж території дослідження та растровими супутниковими знімками високої роздільної здатності. Поєднання цих даних забезпечує можливість виконання комплексного аналізу території, поширення пожеж, оцінки ступеня пошкодження лісових екосистем і подальшого картографування лісових згарищ. Використані матеріали є достатньою інформаційною основою для проведення

моніторингу стану лісових насаджень у межах Кремінського району Луганської області.

Для аналізу обрано дані рівня обробки Level-2A. Це означає, що знімки вже пройшли базову процедуру атмосферної корекції.

Підготовлені растрові канали було імпортовано в ArcGIS Pro, де виконано кілька послідовних операцій. За допомогою інструменту Extract by Mask усі знімки обрізано за межею Кремінського району, що зменшило обсяг даних і відсікло зайву просторову інформацію. Далі на основі шару класифікації сцени з аналізу автоматично вилучено пікселі хмар, диму та тіней, які за спектральними характеристиками можуть імітувати свіжі згарища. На завершення всі очищені растри та векторні шари інтегровано у файлову базу геоданих проєкту (.gdb).

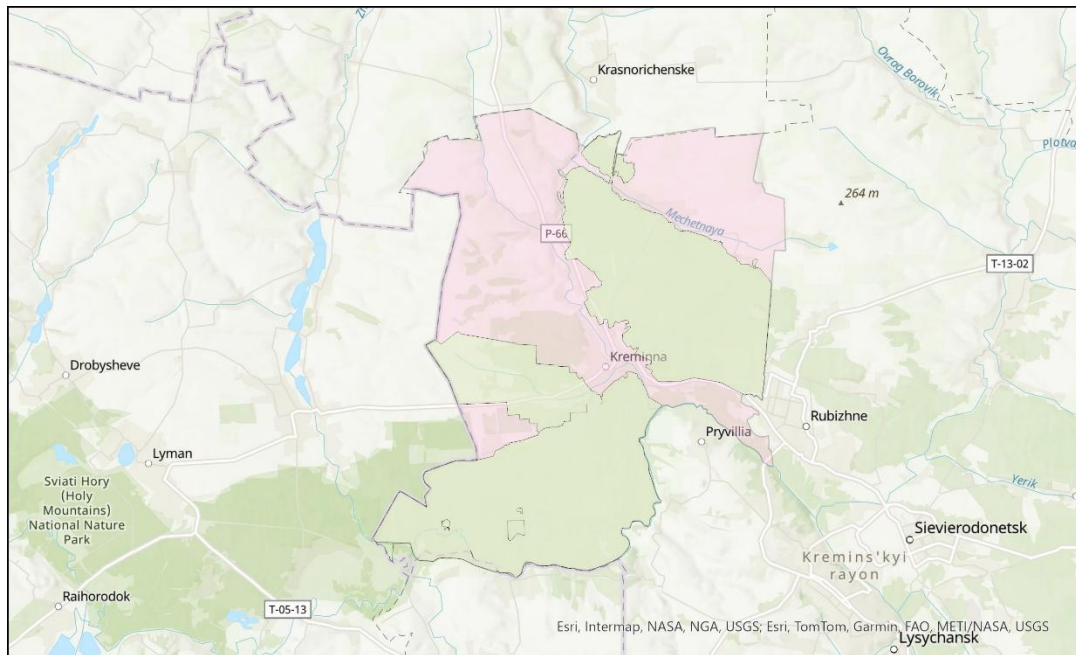
Висновок до розділу 2: У другому розділі розроблено методологічний алгоритм дослідження та спроектовано концептуальну модель бази геопросторових даних у форматі File Geodatabase в ArcGIS Pro. Обґрунтовано вибір спектральних каналів Sentinel-2 для розрахунку індексів NBR, dNBR та MNDWI, а також визначено склад необхідних процедур попередньої обробки: просторове вирівнювання каналів, маскування хмар і водних об'єктів. Структура бази даних забезпечує систематизоване зберігання всіх просторових шарів в єдиній картографічній проєкції WGS 1984 / UTM Zone 37N, що гарантує точність подальших картометричних розрахунків.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДНА РЕАЛІЗАЦІЯ КАРТОГРАФУВАННЯ НАСЛІДКІВ ПОЖЕЖ

3.1. Підготовка та опрацювання вихідних супутникових знімків лісових ресурсів Кременського району Луганської області

На першому етапі дослідної реалізації було здійснено збір та підготовку просторових кордонів об'єкта дослідження. З офіційного геоportалу адміністративно-територіального устрою України було завантажено векторний контур Кременського району. За цим контуром було виконано просторове обрізання (Clip) завантажених супутникових знімків Sentinel-2 тайлу T37UDQ для зменшення обсягу оброблюваних растрових даних та оптимізації обчислювальних ресурсів.

Для аналізу сучасного стану лісів було залучено додаткові картографічні матеріали лісовпорядкування ДП "Кременське лісомисливське господарство". Шляхом сканування, прив'язки в опорних точках (з використанням інструмента Georeferencing) та векторизації планшетів було створено детальний цифровий шар лісових кварталів. Це дозволило в подальшому проводити аналіз пошкодження лісів у розрізі конкретних лісництв та кварталів.



*Рис. 3.1 Загальна карта-схема розташування лісових масивів
Кремінського району та об'єктів природно-заповідного фонду*

3.2. Виконання поліпшення супутникових знімків та виконання атмосферної корекції

Оскільки для дослідження лісових ресурсів Кремінського району були залучені супутникові продукти місії Sentinel-2 вищого рівня обробки Level-2A, вони вже пройшли первинну атмосферну корекцію за алгоритмом Sen2Cor і містили готові значення відбивальної здатності безпосередньо земної поверхні (BOA). Це дозволило повністю виключити етап додаткової радіометричної калібровки та забезпечило високу математичну точність для подальшого розрахунку спектральних індексів[25].

Проте для покращення сприйняття лісових згарищ людським оком, а також для підготовки зображень до якісного візуального аналізу та векторизації,

в середовищі ArcGIS Pro було виконано операції візуального поліпшення та спектрального синтезу.

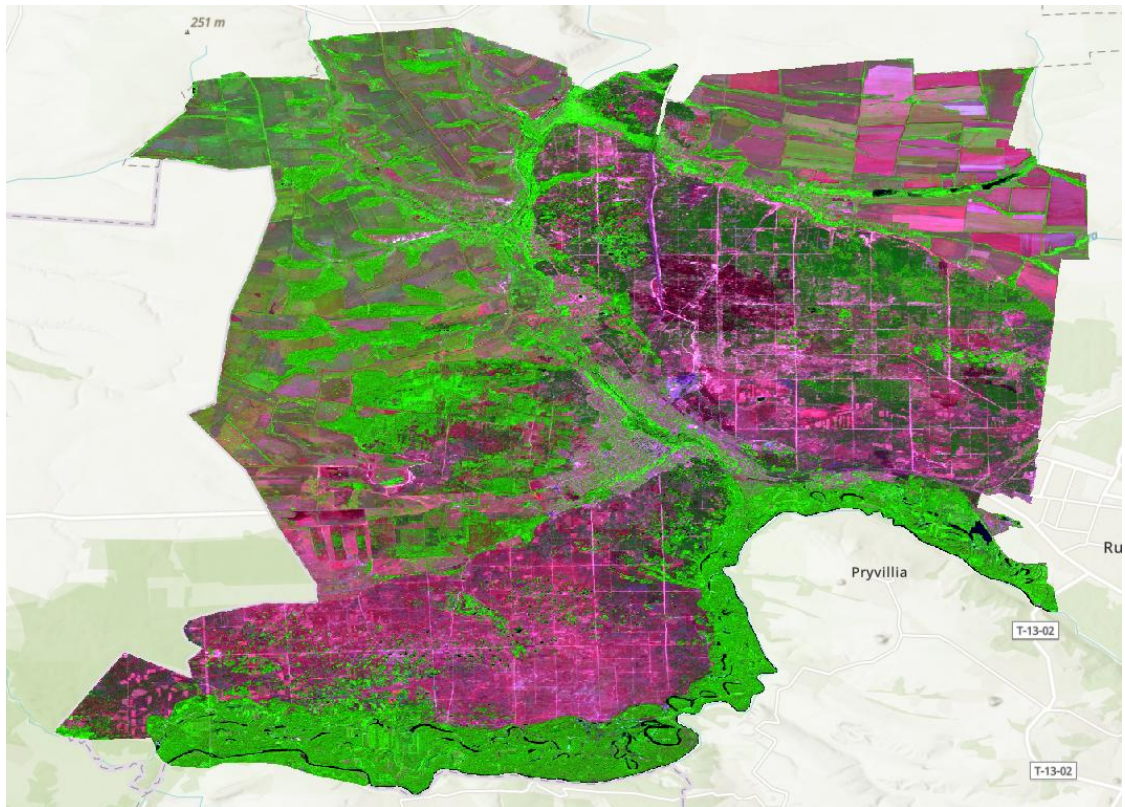


Рис. 3.2 Мультиспектральний супутниковий знімок Sentinel-2 території Кременського району у спектральному синтезі штучних кольорів SWIR-NIR-Red (канали 12-8-4)

Спочатку було створено композитні знімки за допомогою інструменту Composite Bands. Для дешифрування пошкоджених лісів найбільш інформативним виявився спектральний синтез у штучних кольорах SWIR-NIR-Red (канали 12-8-4). У цій комбінації здорова соснова хвоя, яка має високий вміст води та хлорофілу, сильно відбиває в каналі 8 (NIR) та інтенсивно поглинає в каналі 12 (SWIR). На екрані монітора такі лісові масиви відображаються глибоким темно-зеленим кольором.

Натомість ділянки, пройдені вогнем, де знищено вегетаційний покрив та оголено сухий обвуглений субстрат, інтенсивно відбивають випромінювання у короткохвильовій інфрачервоній зоні (SWIR, канал 12) та майже не відбивають у ближній інфрачервоній (NIR, канал 8). Це обумовлює їх яскравий червоно-

коричневий або теракотовий колір на композиті, що дозволяє чітко дешифрувати навіть невеликі осередки вигорання.

Для підвищення локального контрасту на межах вигорілих ділянок було застосовано динамічне розтягування гістограми (Histogram Stretching) в ArcGIS Pro[21]. Це дозволило деталізувати внутрішню структуру згарищ та чітко відокремити їх від сухих піщаних арен річки Сіверський Донець без зміни вихідних спектральних даних растру.

3.3. Опрацювання різночасових супутникових знімків

Для дослідження військових руйнувань у період 2022-2024 років було підібрано знімки, зроблені в один і той самий літній період (середина липня). Це забезпечило збіг фенологічної фази розвитку рослинності та дозволило уникнути помилкового визначення природного засихання трав'яного покриву як наслідків пожежі.

Процедура опрацювання різночасових знімків у середовищі ArcGIS Pro складалася з таких послідовних кроків:

- Виконано перевірку геометричного збігу пікселів. Оскільки вихідні знімки Sentinel-2 орторектифіковані за єдиною глобальною моделлю рельєфу, взаємне зміщення між знімками різних дат не перевищувало 1-2 метрів. Це є цілком прийнятним показником для регіонального ГІС-дослідження лісових масивів.
- Для нівелювання залишків атмосферного впливу та варіацій освітленості було проведено відносну радіометричну нормалізацію (*Relative Radiometric Normalization*) методом псевдоінваріантних об'єктів (*Pseudo-Invariant Features - PIF*)[23]. Як такі еталонні об'єкти було обрано капітальні будівлі міста Кременна та асфальтовані ділянки автомобільних доріг, спектральні характеристики яких залишалися стабільними та незмінними протягом усього періоду спостережень (2020-2024 рр.).

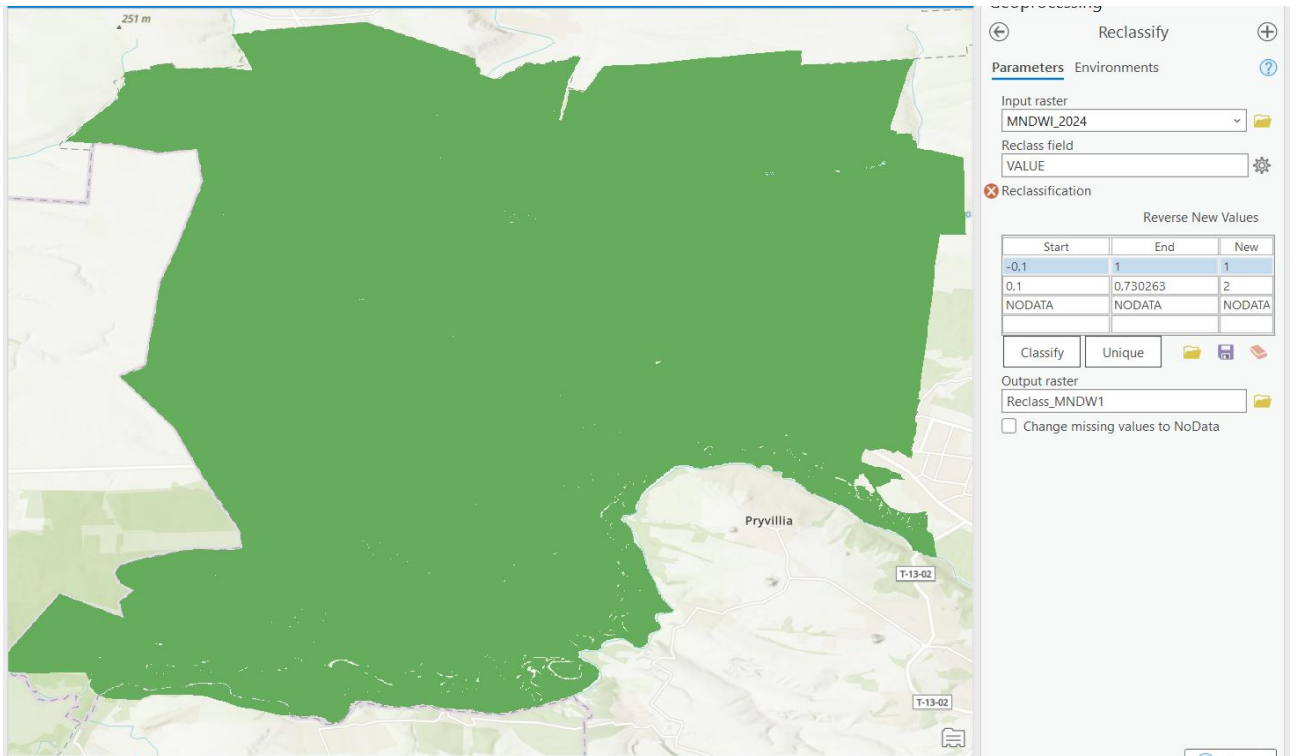


Рис. 3.3 Вікно налаштування параметрів інструменту Reclassify для генерації маски суші та води на основі розрахованого індексу MNDWI.

• Річка Сіверський Донець та численні озера Кременщини мають низьке відбиття як у NIR, так і у SWIR-діапазонах. Для запобігання появі помилкових значень на стику води та суші всі водні об'єкти були виключені за допомогою маски, побудованої на основі Модифікованого нормалізованого різницевого індексу води (MNDWI)[22], який розраховується за формулою:

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Band 3} - \text{Band 11}}{\text{Band 3} + \text{Band 11}} \quad (3.1),$$

де Band 3 - спектральний канал ;

Band 11 - короткохвильовий інфрачервоний канал.



Рис. 3.4 Візуалізація результату просторового маскування та ізоляції дзеркала води р. Сіверський Донець на тлі спектрального синтезу 12-8-4.

3.4. Застосування індексу NBR для території Кременського району

Для дослідження було розраховано шість базових растрових шарів індексу NBR.

Розрахунок індексу виконувався в середовищі ArcGIS Pro за допомогою інструменту Raster Calculator окремо для кожного часового зрізу за формулою:

$$NBR = \frac{\text{Band 8 (NIR)} - \text{Band 12 (SWIR-2)}}{\text{Band 8 (NIR)} + \text{Band 12 (SWIR-2)}} \quad (3.2),$$

де Band 8 - спектральний канал ближнього інфрачервоного діапазону

Band 12 - короткохвильовий інфрачервоний канал

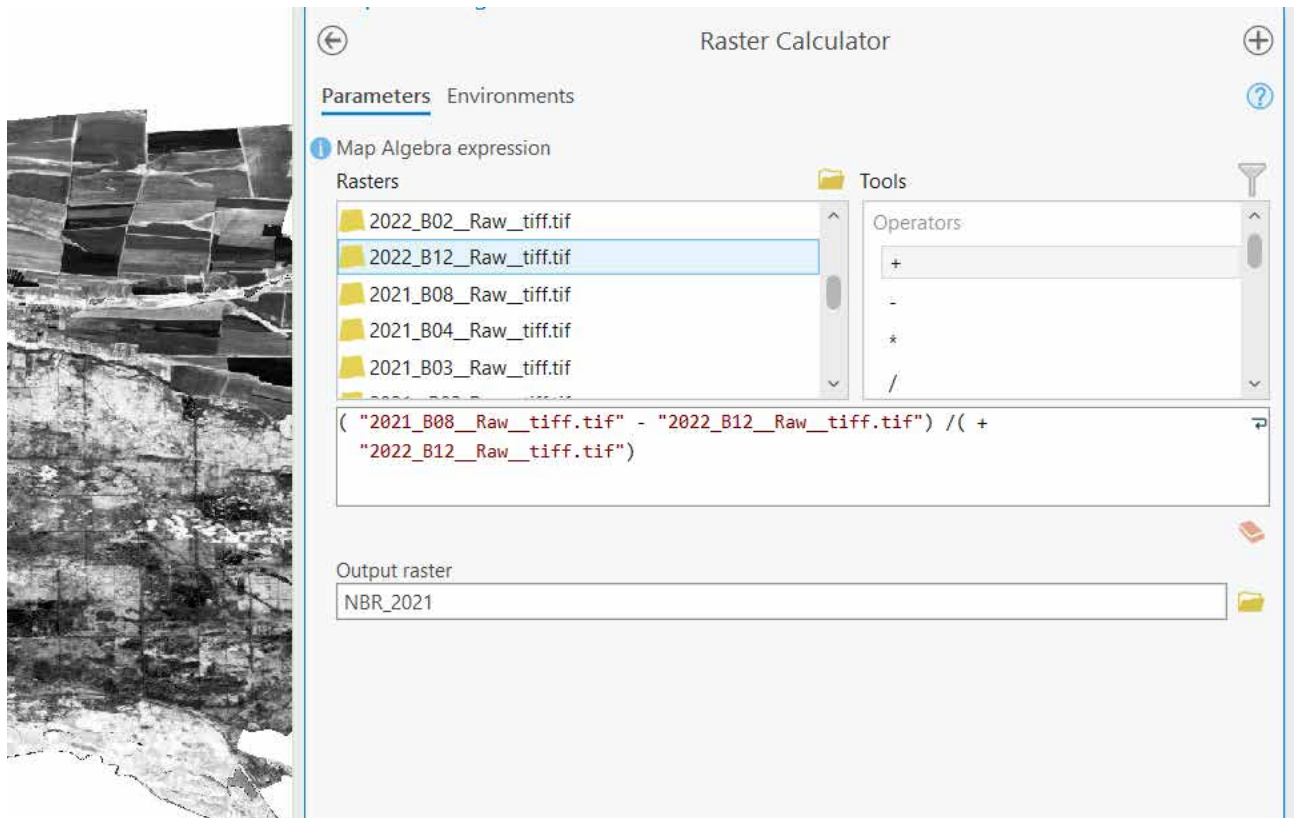


Рис. 3.5 Вікно налаштування параметрів та введення математичного виразу в інструменті Raster Calculator для генерації растрових моделей NBR

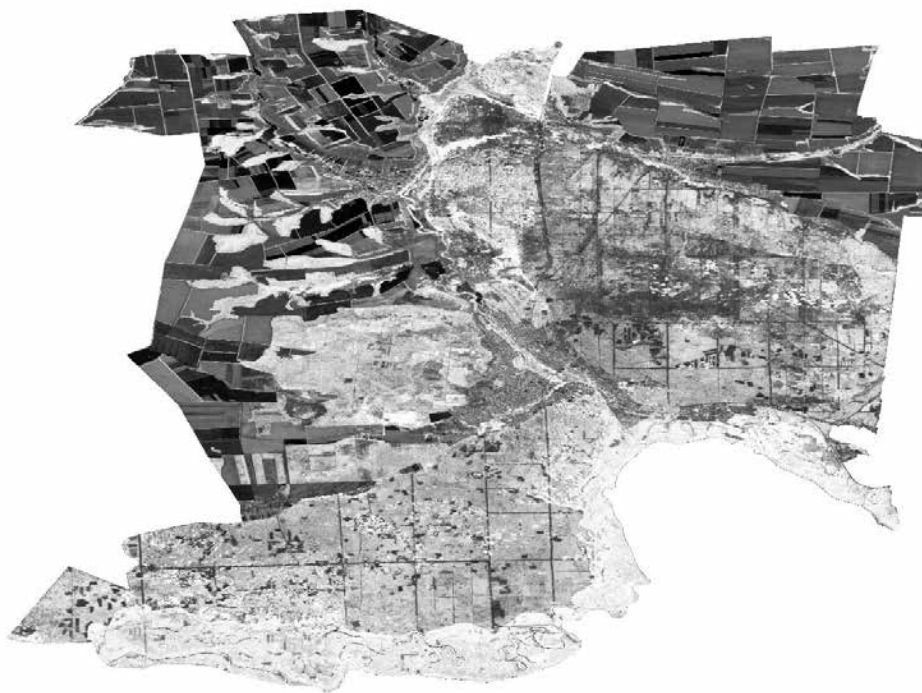


Рис. 3.6 Просторовий розподіл індексу NBR на території дослідження у вересні 2020 року (до пожежі)

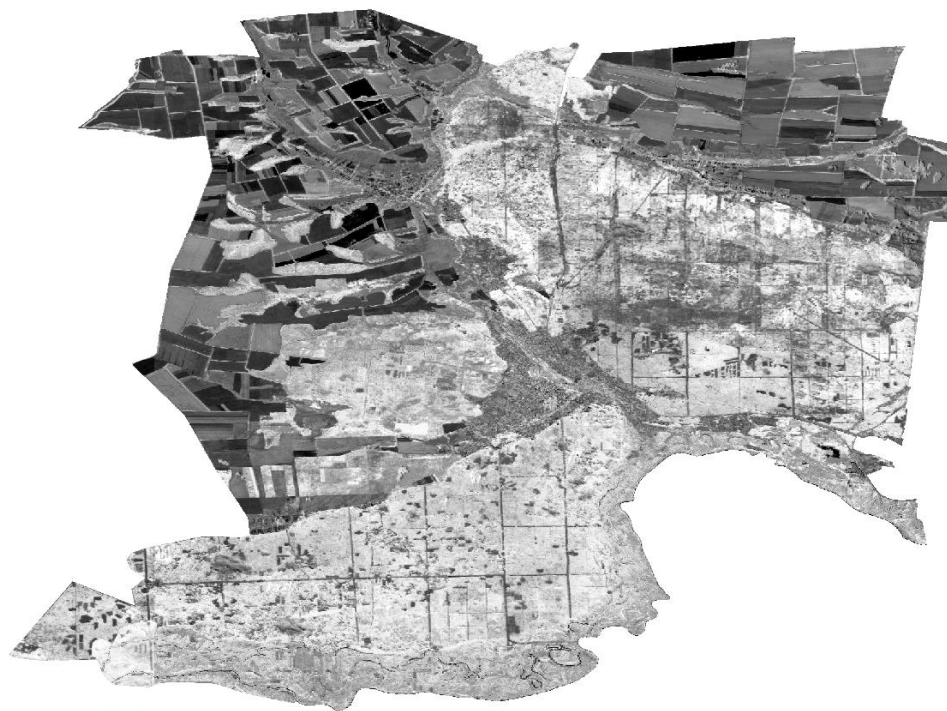


Рис. 3.7 Просторовий розподіл індексу NBR на території дослідження у жовтні 2020 року (після пожежі)

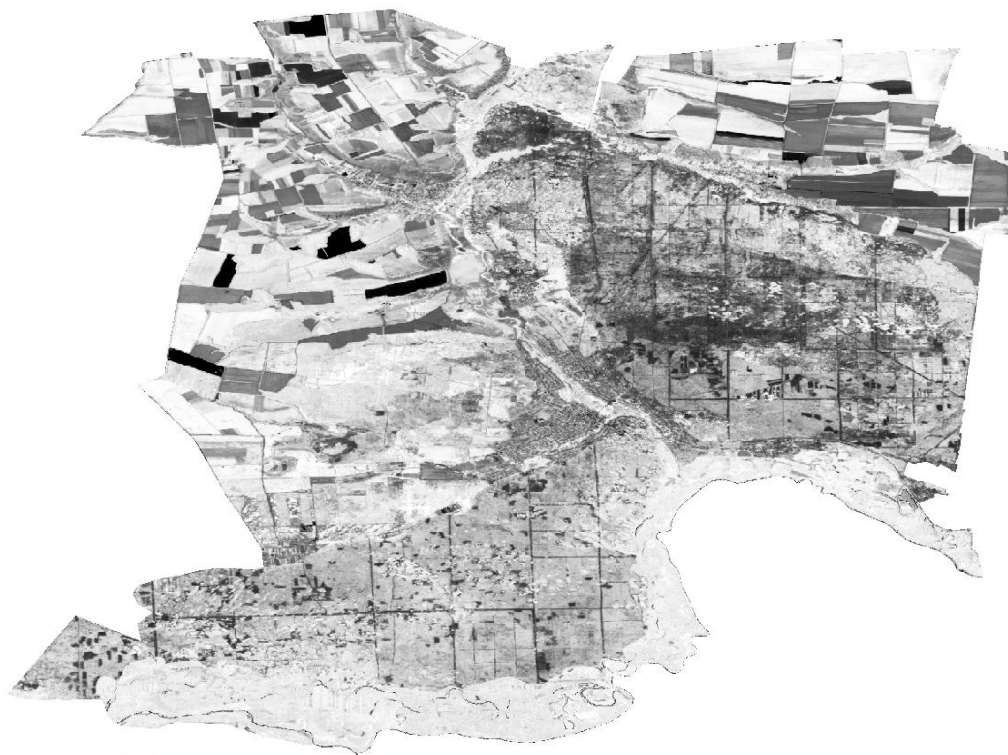


Рис. 3.8 Просторовий розподіл індексу NBR на території дослідження у серпні 2021 року

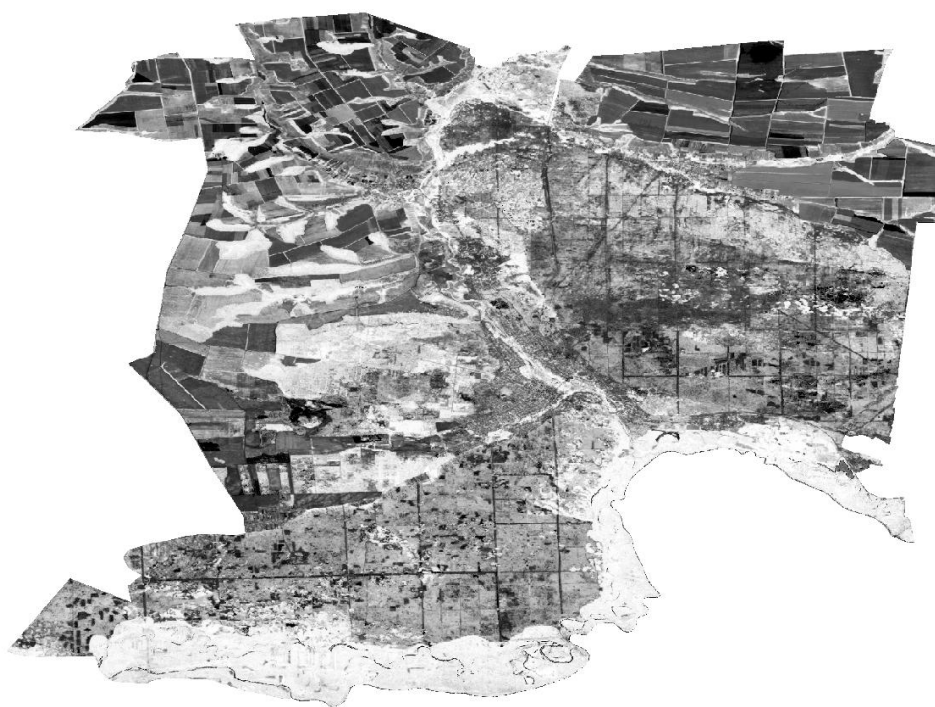


Рис. 3.9 Просторовий розподіл індексу NBR на території дослідження у серпні 2022 року

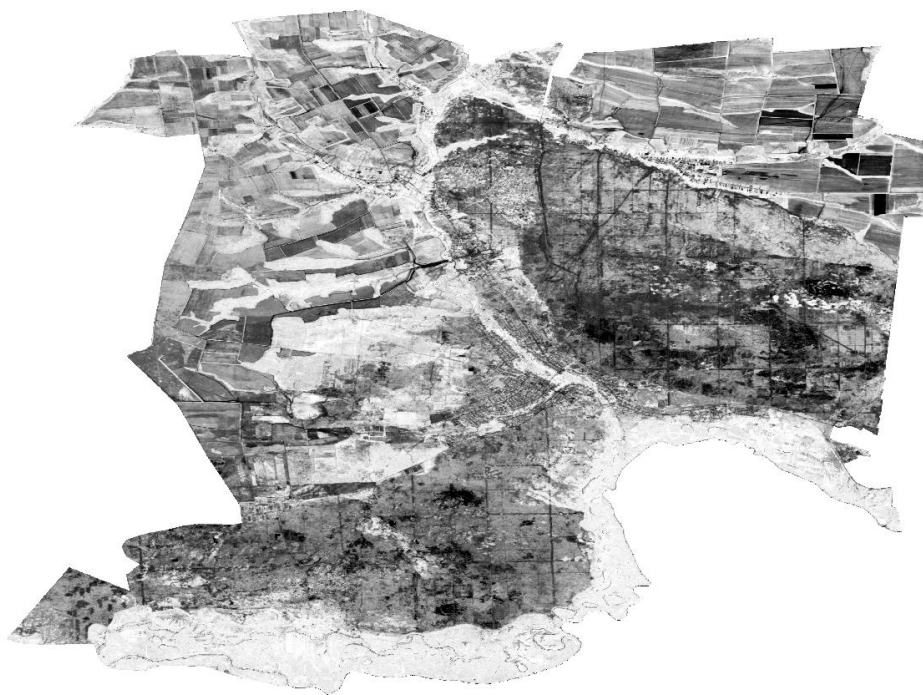


Рис. 3.10 Просторовий розподіл індексу NBR на території дослідження у серпні 2023 року



Рис. 3.11 Просторовий розподіл індексу NBR на території дослідження у серпні 2024 року

Етапом контролю якості обчислень став аналіз частотного розподілу значень згенерованих растрових матриць, виконаний через панель *Symbolology* в ArcGIS Pro

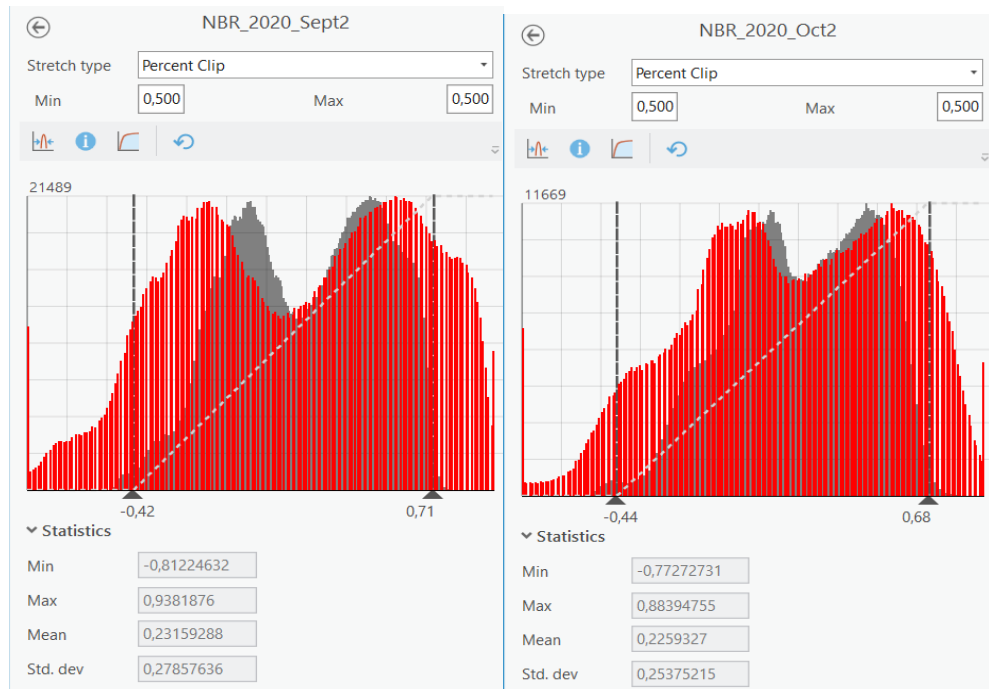


Рис. 3.12 Статистичні показники та гістограми розподілу значень індексу NBR для території Кременського району у 2020 році до пожежі та після

Аналіз отриманих статистичних метрик та гістограм показав, що загальний теоретичний діапазон значень індексу склав від -0.81 до +0.93 (Рис. 3.12). При цьому для здорових, густих соснових насаджень Кременського лісу значення індексу NBR стійко варіювали в межах локального піку від +0.48 до +0.72. Листяні породи дерев у заплаві річки Сіверський Донець (вільха, дуб) через вищий вміст вологи у клітинах мали ще вищі показники - до +0.81.

Після жовтневої пожежі на гістограмі фіксується падіння індексу NBR до стабільних негативних показників у діапазоні від -0.15 до -0.48.

Основою сформованих растрових шарів було розраховано різниці індекси згарищ dNBR, які відображають динаміку деградації біомаси:

Для оцінки наслідків природної пожежі 2020 року розрахунок проводився за формулою:

$$dNBR_{2020} = NBR_{2020_Sept} - NBR_{2020_Oct} \quad (3.3),$$

Для оцінки накопичувальних (кумулятивних) воєнних руйнувань порівняно з довоєнним:

$$dNBR_{war2022} = NBR_{2021_Aug} - NBR_{2022_Aug} \quad (3.4),$$

$$dNBR_{war2023} = NBR_{2021_Aug} - NBR_{2023_Aug} \quad (3.5),$$

$$dNBR_{war2024} = NBR_{2021_Aug} - NBR_{2024_Aug} \quad (3.6),$$

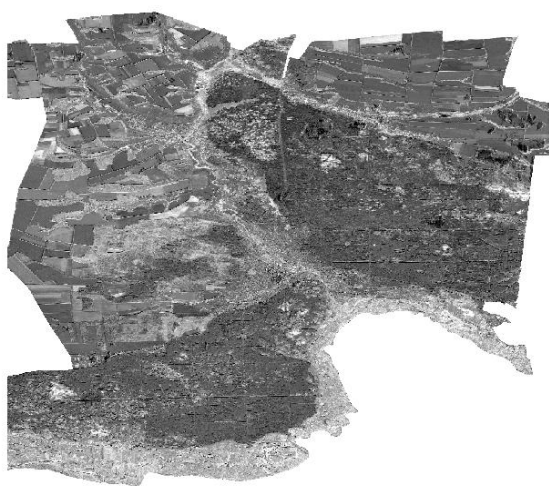


Рис. 3.13 Модель $dNBR$ 2021 р.



Рис. 3.14 Модель $dNBR$ 2022 р



Рис. 3.15 Модель $dNBR$ 2023 р



Рис. 3.16 Модель $dNBR$ 2024 р

3.5. Виконання класифікації супутникових знімків лісових ресурсів для виділення згарищ

Для розділення масиву значень растру на класи пошкодження було використано стандартний інструмент Reclassify модуля *Spatial Analyst* в ArcGIS Pro.

Перед виконанням просторового моделювання було проведено аналіз статистичних метрик та закону розподілу частот на отриманих растрових матрицях динаміки змін

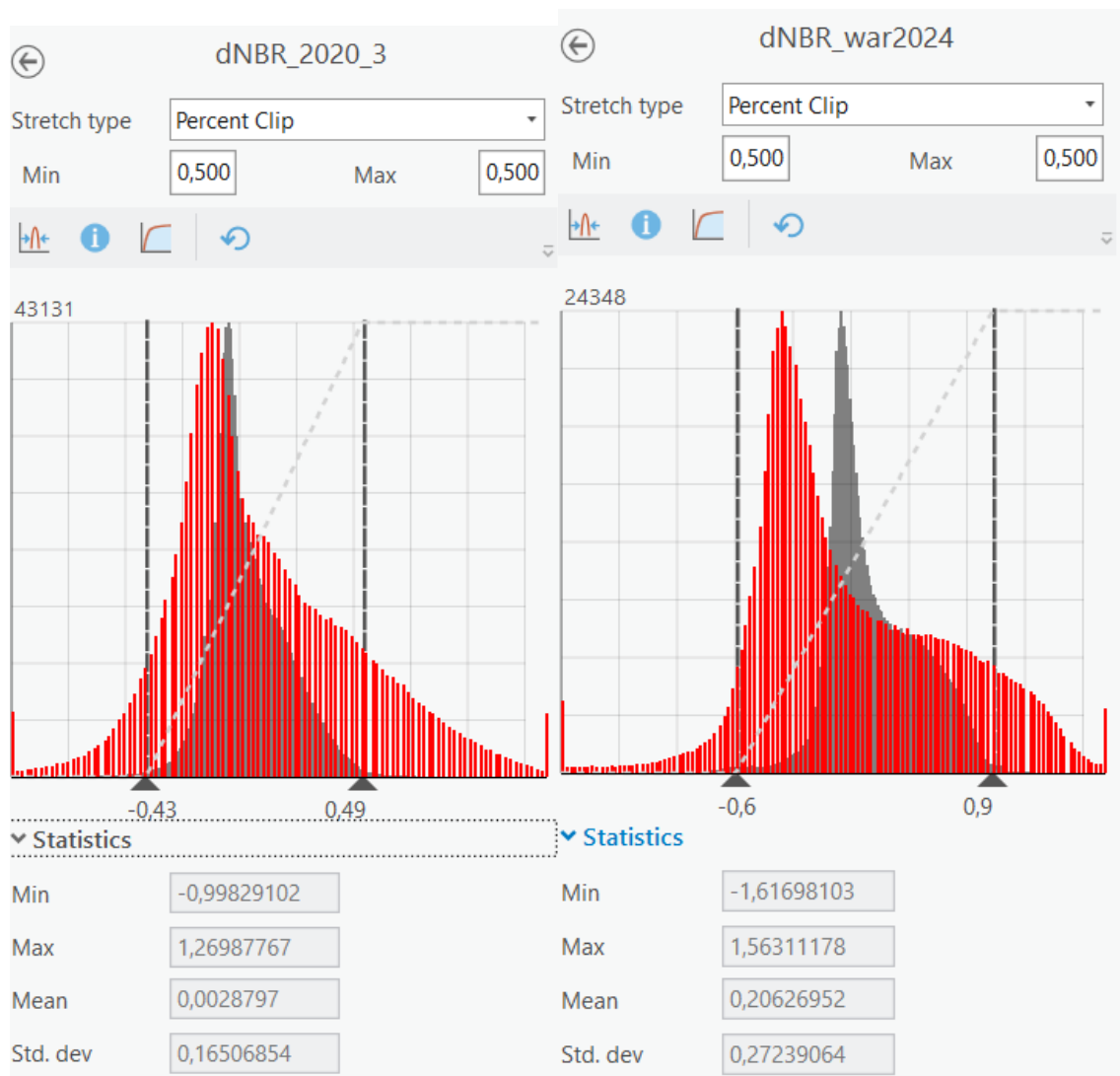


Рис. 3.17 Гістограми розподілу та статистичні метрики різницевого нормалізованого індексу згарищ dNBR в ArcGIS Pro: зліва - для природної пожежі 2020 року; справа - для кумулятивних воєнних руйнувань станом на липень 2024 року.

Растр dNBR 2020 року має середнє значення близьке до нуля (Mean = 0,0028), що свідчить про локальний характер пожежі без суттєвого впливу на весь масив. На растрі 2024 року середнє зростає до 0,2062, а стандартне відхилення - до 0,272, що відображає масштабне і накопичувальне пошкодження лісу вздовж лінії бойових зіткнень.

Оскільки значення dNBR нижче 0,270 давали значну кількість похибок через сезонне висихання трав та коливання вологості піщаних ґрунтів, цей рівень було обрано як нижній поріг для виявлення реальних пошкоджень.

Нижній поріг класифікації було встановлено на рівні dNBR = 0,270. Усі значення нижче цього порогу отримали статус NODATA і були виключені з аналізу як непошкоджені території.

За результатами рекласифікації виділено три класи пошкодження:

Низький (dNBR 0,270-0,439) - часткове ураження підліску або окремих дерев, крони здебільшого збережені.

Середній (dNBR 0,440-0,659) - значна деградація деревостану внаслідок пожеж та обстрілів.

Високий / суцільне згарище (dNBR $\geq 0,660$) - повне знищення насаджень, жива біомаса відсутня.

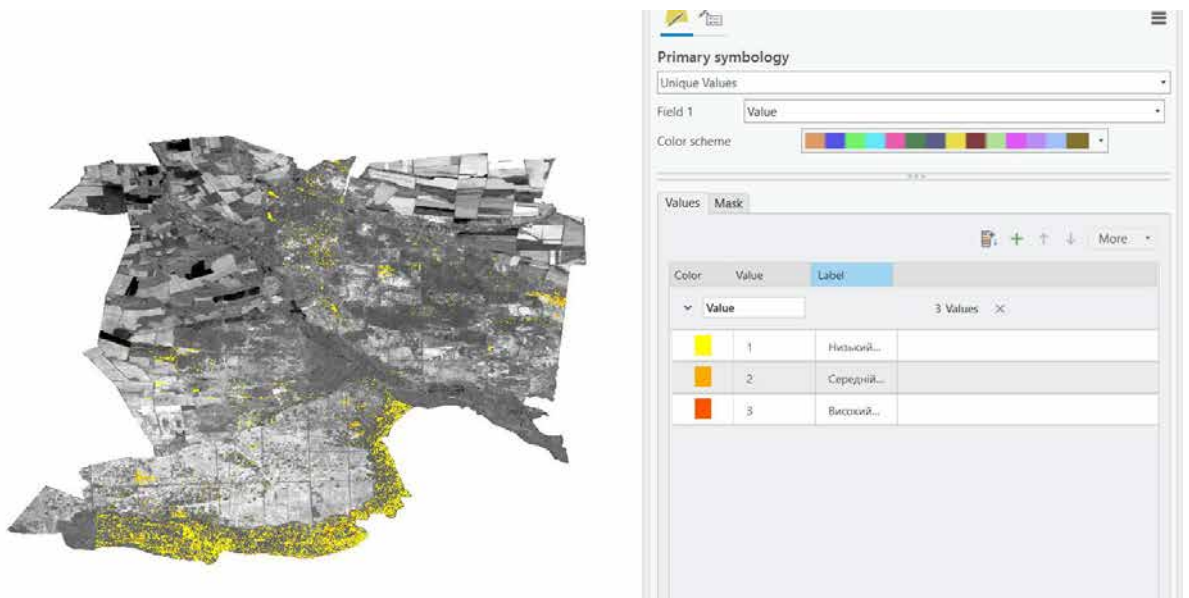


Рис. 3.18 Природна пожежа 2020 року

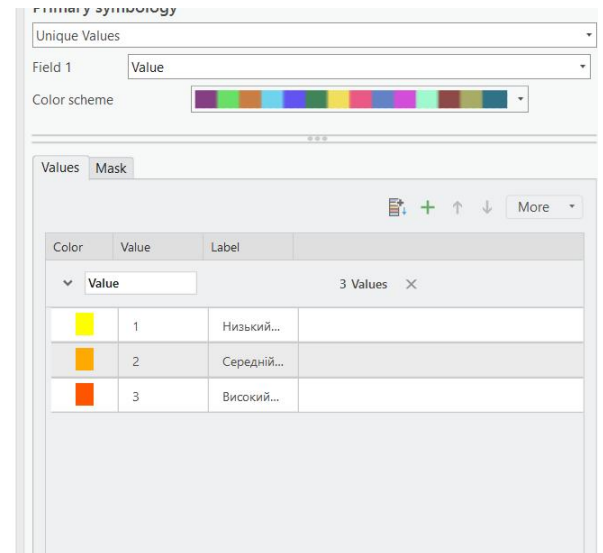
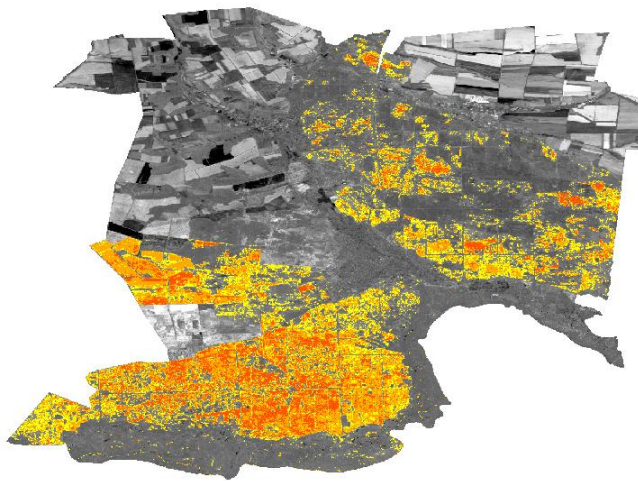


Рис. 3.19 Кумулятивні воєнні руйнування, липень 2024 року

Створені класифіковані растрові шари стали основою для проведення просторового аналізу, картографічного відображення та підрахунку площ втрат лісу.

3.6. Векторизація місць локалізації лісових згарищ Кременського району та оцінювання їх втрат.

На першому етапі растри було конвертовано у векторні полігони за допомогою інструменту Raster to Polygon. Полем конвертації обрано Value, у результаті чого кожному класу пошкодження у вихідному шарі відповідає унікальне значення поля gridcode (1, 2 або 3).

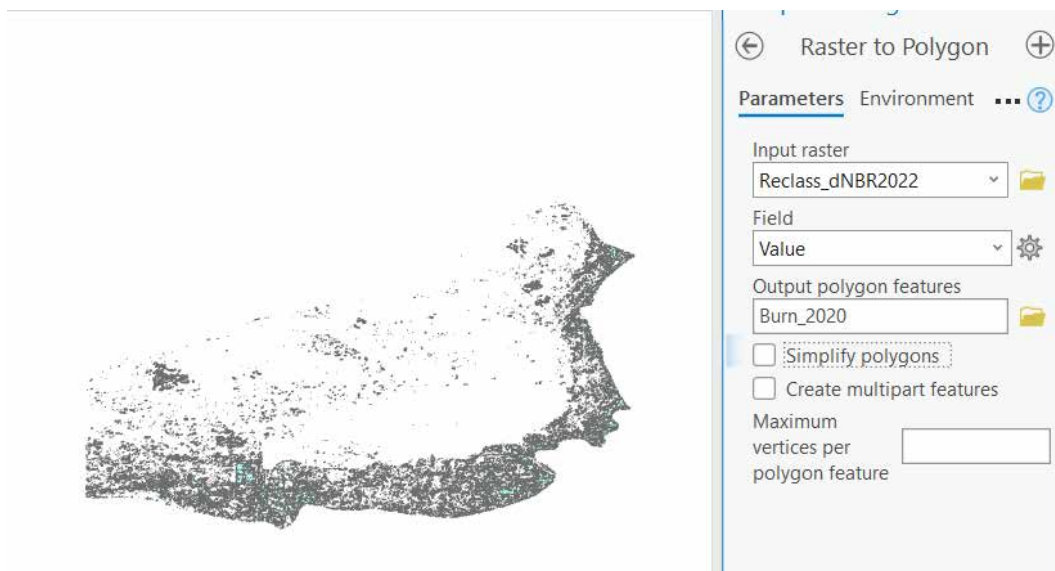


Рис. 3.20 Векторні полігони осередків пожеж 2020 р.

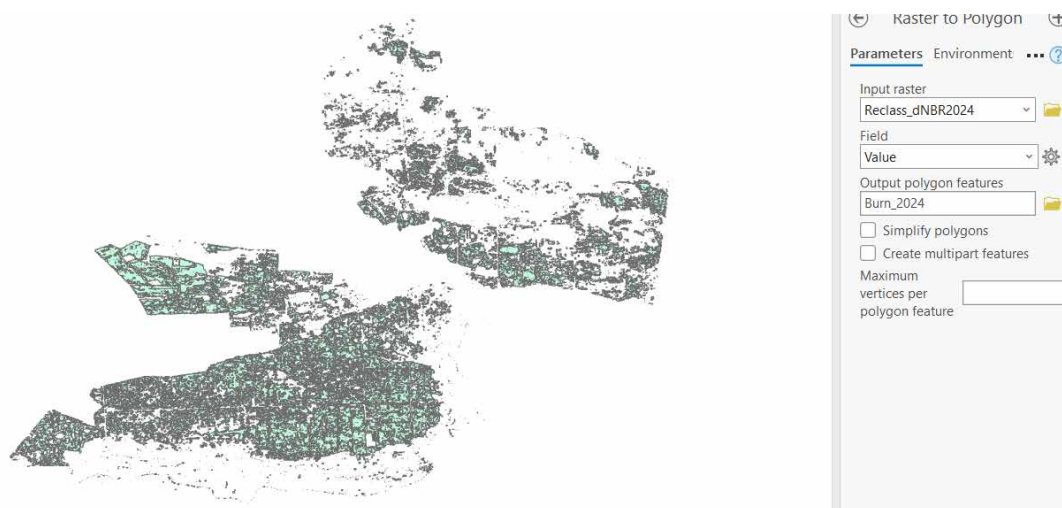


Рис. 3.21 Векторні полігони осередків кумулятивних пожеж 2024 р.

Для розрахунку площ в атрибутивних таблицях обох векторних шарів створено числове поле Area_ha. Площі полігонів обчислено інструментом Calculate Geometry у проєкції WGS 84 / UTM zone 37N, що забезпечує мінімальні спотворення для території Луганської області.

OBJECTID *	Shape *	gridcode	Shape_Length	Shape_Area	Area_ha
1	Polygon	1	14,655872	0,001627	1325,344192
2	Polygon	2	2,746501	0,0002	163,26681
3	Polygon	3	0,621481	0,000046	37,477868

OBJECTID *	Shape *	gridcode	Shape_Length	Shape_Area	Area_ha
1	Polygon	1	37,94882	0,005285	4298,542079
2	Polygon	2	33,258087	0,006306	5130,102302
3	Polygon	3	14,850705	0,00288	2342,958049

Рис. 3.22 Обчислені площі уражених лісів

Сумарні площі за кожним класом пошкодження розраховано інструментом Summary Statistics із групуванням за полем gridcode та підсумовуванням значень Area_ha. Отримані результати зведено в Таблиця 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняльна характеристика площ лісових згарищ Кременського району від природних пожеж та воєнних дій

Період	Низький ступінь	Середній ступінь	Високий ступінь	Загальна площа ураженого лісу, га
Осінь 2020 р.	1325,3	163,3	37,5	1526,1
Липень 2024 р.	4298,5	5130,1	2343,0	11771,6

Порівняння даних в Таблиця 3.1 наочно демонструє різницю між наслідками природної пожежі та воєнних дій. У 2020 році ураження мало локальний характер із загальною площею 1526,1 га, тоді як станом на липень 2024 року цей показник зріс до 11771,6 га - тобто у 7,7 раза. Особливо показовим є різке збільшення частки високого ступеня пошкодження: з 37,5 га до 2343,0 га, що свідчить про масштабні незворотні втрати лісового фонду Кременського району внаслідок тривалого вогневого впливу вздовж лінії фронту.

3.7. Картографічне відображення результатів ГІС-моніторингу лісових згарищ

Процес формування фінальних карт у середовищі ArcGIS Pro виконувався в режимі компоновання (Layout view) за такими основними етапами:

Було обрано аркуша формату А3 з альбомною орієнтацією. Як просторову основу використано векторні шари меж Кременського району та лісових масивів

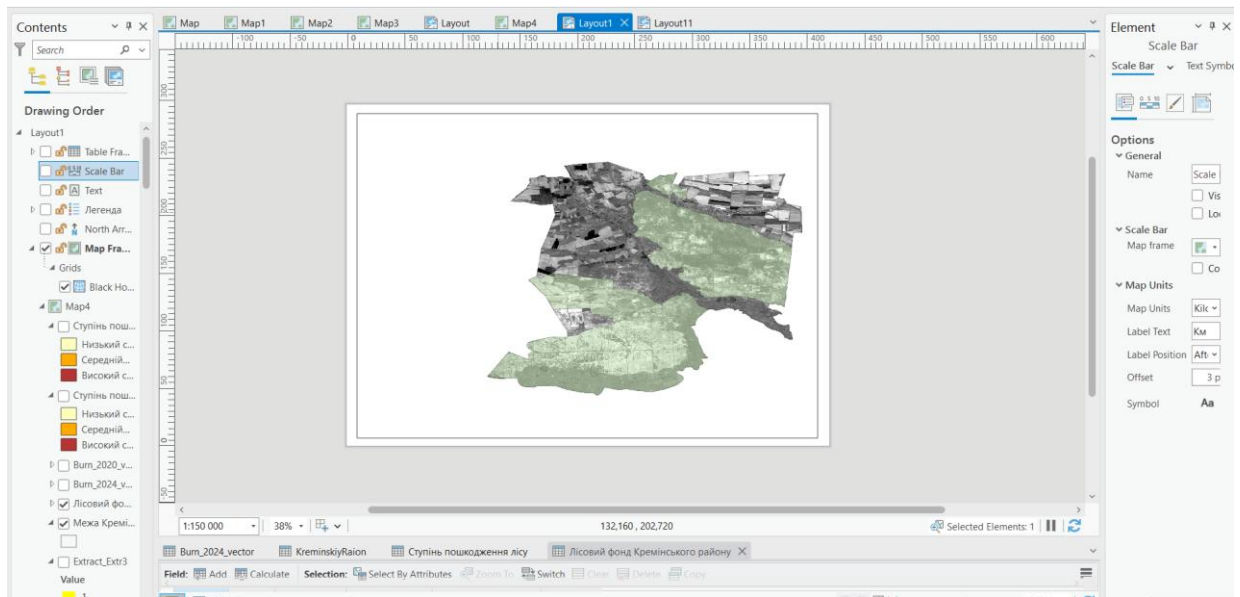
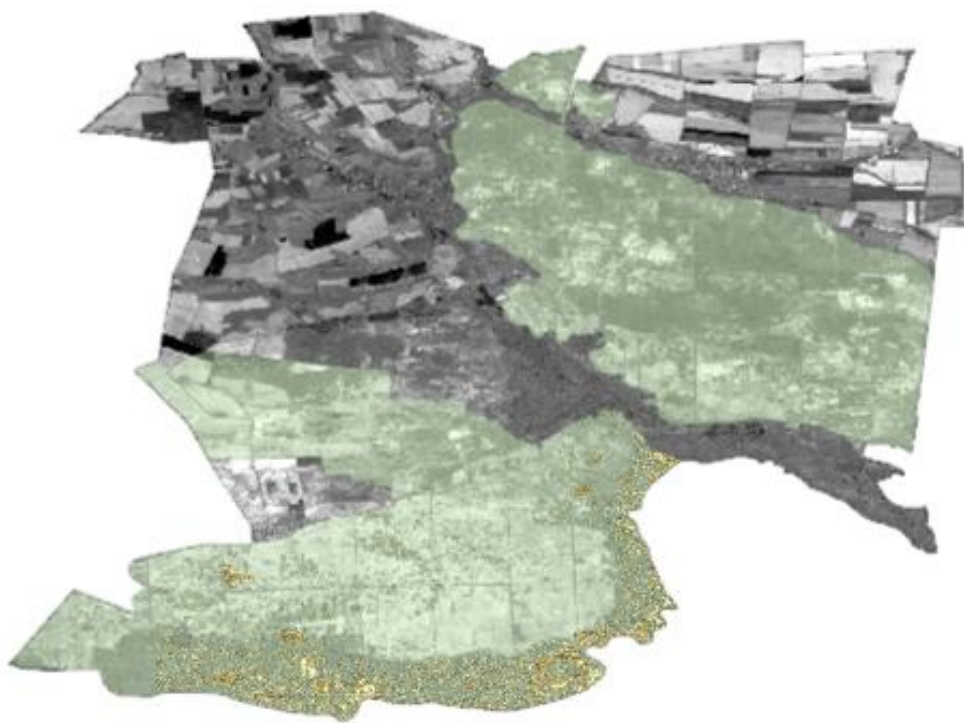


Рис. 3.23 Інтерфейс налаштування параметрів аркуша

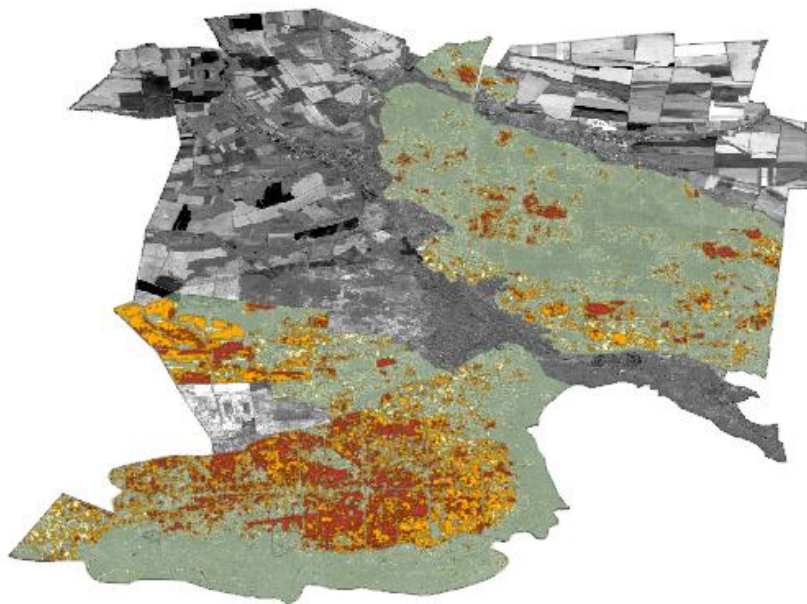
Для відображення динаміки руйнувань було сформовано двокомпонентне картографічне вікно, що містить дві порівняльні карти:

- Карта А: Стан лісового фонду після природної пожежі осені 2020 року.
- Карта Б: Кумулятивний стан лісового фонду в зоні бойових дій станом на липень 2024 року.

Для обох карт-схем (Рис. 3.24 та Рис. 3.25) застосовано ідентичну систему умовних позначень (*Symbology*), що базується на трьох кольорах «пожежної» палітри: низький ступінь пошкодження - жовтий колір, середній - помаранчевий, високий ступінь (суцільне згарище) - насичений червоний колір. Стабільні ділянки лісу та території за межами лісового фонду залишені напівпрозорими для збереження візуального балансу карти.



*Рис. 3.24 Карта-схема просторового розподілу лісових згарищ
Кремінського району за ступенем пошкодження рослинності восени 2020 року*



*Рис. 3.25 Карта-схема кумулятивного просторового розподілу лісових
згарищ у зоні бойових дій станом на липень 2024 року*

До макету карти додано стандартні елементи оформлення: легенду з розшифровкою класів пошкодження лісу та їх площ у гектарах, динамічну масштабну лінійку в кілометрах, стрілку північ та заголовок карти.

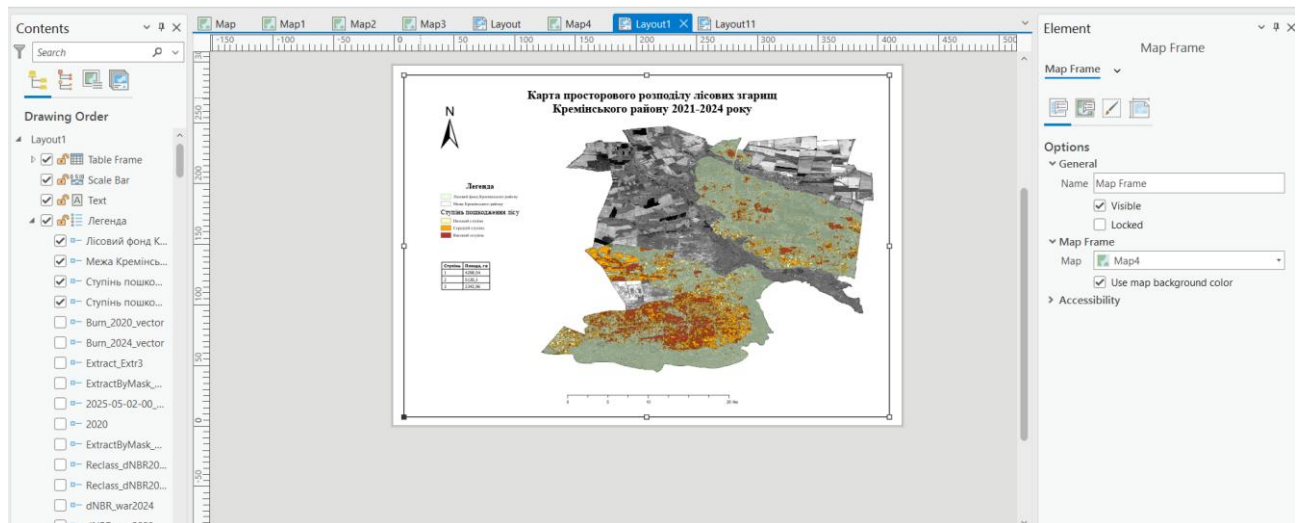


Рис. 3.26 Компонування карти лісових згарів із нанесеними елементами оформлення в ArcGIS Pro

Висновок до розділу 3: Практична реалізація методики підтвердила її ефективність для умов збройного конфлікту. Розраховані растри NBR та dNBR дозволили зафіксувати значне зростання пірогенного ураження: від 1526,1 га після природної пожежі 2020 року до 11771,6 га кумулятивних воєнних руйнувань станом на липень 2024 року - збільшення у 7,7 раза. Обґрунтовано нижній поріг класифікації dNBR = 0,270, виділено три класи пошкодження, а результати векторизовано та картографовано у вигляді порівняльних карт-схем формату А3. Отримані просторові моделі та статистичні дані є готовою основою для оцінки екологічних збитків і розробки проєктів повоєнного відновлення лісів Кременщини.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі досліджено та практично реалізовано методику геоінформаційного моніторингу лісових згарищ Кременського району Луганської області за допомогою даних дистанційного зондування Землі. Проведена робота дозволяє зробити такі висновки:

Наразі неможливо повноцінно дослідити ліса Кременського району через активні бойові дії, суцільне замінування лісів та загрозу від нерозірваних снарядів. Використання мультиспектральних знімків супутника Sentinel-2 разом із функціоналом ArcGIS Pro дало змогу безпечно й оперативно оцінити масштаби та отримати кількісні показники руйнувань лісового масиву.

Процесом проєктування було створено концептуальну модель бази геопросторових даних. Для систематизації матеріалів у середовищі ArcGIS Pro сформовано файлову геобазу (File Geodatabase). До її структури увійшли всі необхідні шари: межі району, квартальна сітка лісгоспу, межі заказника «Серебрянський», а також растрові дані (знімки Sentinel-2, маски хмарності SCL та результати розрахунку індексу dNBR). Переведення всіх даних у єдину картографічну проєкцію WGS 1984 / UTM Zone 37N гарантує метричну точність картометричних розрахунків.

Залучено знімки Sentinel-2 рівня обробки Level-2A за п'ять періодів: вересень-жовтень 2020 року та липень 2021-2024 років. Якість вихідних зображень покращено завдяки спектральному синтезу в комбінації каналів SWIR-NIR-Red (12-8-4), очищенню від хмар і задимлення за допомогою SCL-маски, а також відносній радіометричній нормалізації за методом псевдоінваріантних об'єктів. Водні об'єкти відсічено за допомогою індексу MNDWI.

За допомогою інструменту Raster Calculator розраховано часові серії індексів NBR та dNBR, проведений аналіз гістограм показав, що здорові соснові насадження Кременського лісу мають показники NBR від +0,48 до +0,72, тоді як пройдені вогнем ділянки зміщуються в негативну зону (від -0,15 до -0,48). Через

попільське віднімання сформовано різницею растри dNBR, що дозволило порівняти наслідки природної пожежі 2020 року та кумулятивних воєнних руйнувань 2022-2024 років.

Після проведено порогову класифікацію ступенів пошкодження лісового фонду - статистика растрів dNBR чітко відображає різницю між двома чинниками: середнє значення для пожежі 2020 року становило 0,0028 (локальний вплив), а для воєнного стану 2024 року воно зросло до 0,2062, що підтверджує глибоку деградацію лісового намету. Щоб нівелювати вплив сезонного висихання трав та коливань вологості піщаних ґрунтів тераси Сіверського Донця, нижнім порогом реального випаленого лісу визначено $dNBR = 0,270$. Після рекласифікації виділено три класи ураження: низький (0,270-0,439), середній (0,440-0,659) та високий / суцільне згарище (від 0,660).

Класифіковані растри було переведено у векторну форму для розрахунку площ втрат. Конвертація у полігони та запуск інструментів Calculate Geometry і Summary Statistics дозволили порівняти масштаби руйнувань. Природна пожежа 2020 року мала локальний характер й охопила 1526,1 га (переважно низький ступінь - 1325,3 га, суцільне згарище - лише 37,5 га). Натомість воєнні руйнування на липень 2024 року охопили вже 11771,6 га, що у 7,7 рази більше. Особливо критичним є збільшення площ суцільних згарищ до 2343,0 га та середнього ураження - до 5130,1 га, що вказує на переважно незворотну деградацію екосистеми.

У режимі Layout view в ArcGIS Pro підготовлено двокомпонентне картографічне компонування формату A3 для порівняння просторового розподілу згарищ. Для карт застосовано єдину шкалу умовних позначень (жовтий, помаранчевий та червоний кольори), додано легенду з експлікацією площ, масштабну лінійку та орієнтир на північ.

Загальний висновок. Запропонований підхід до моніторингу на основі знімків Sentinel-2 та індексного моделювання dNBR довів свою практичну ефективність в умовах збройного конфлікту. Створені просторові моделі та статистичні дані є готовою основою для офіційної оцінки екологічних збитків,

підготовки судових позовів, а також для формування проєктів землеустрою щодо повоєнного відновлення лісів Кременщини та оптимізації землекористування в Луганській області.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шпурик В.В., Бандурка О.І. Інформаційна система аналізу антропогенного впливу на стан лісових насаджень. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2021. № 3(72). С. 25–37.
2. Білай А. О., Бичкова М. В. Аналіз методів обробки космічних даних. *Людина і Космос* : матеріали XXVI Міжнар. наук.-практ. конф. (Дніпро, 10–12 квіт. 2024 р.). Дніпро, 2024. С. 149–150.
3. Перебування у лісі: правила пожежної безпеки. *Судова влада України*. URL: <https://sudrada.gov.ua/perebuvannya-u-lisi-pravyla-pozhezhnoyi-bezpeky/> (дата звернення: 11.05.2026).
4. Аналіз статистики лісових пожеж та їхнього впливу на клімат України на основі обробки даних супутникових знімків у глобальній інформаційній системі GWIS. Український журнал дистанційного зондування: веб-сайт. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/279> (дата звернення: 14.05.2026)
5. Електронний архів наукових публікацій НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c6379c02-ce8a-490c-be1b-8bd6d640f8e3/content> (дата звернення: 14.05.2026).
6. Вплив лісових пожеж. Південно-Східне міжрегіональне управління лісового та мисливського господарства: веб-сайт. URL: <https://se.forest.gov.ua/press-sluzhba/novini-upravlinnya/vpliv-lisovix-pozhezh.html> (дата звернення: 14.05.2026)
7. Фінансовий профіль Кремінської територіальної громади / Луганська обласна державна адміністрація. URL: https://lova.gov.ua/sites/default/files/collections/financial_profile_kreminska_0tg.pdf (дата звернення: 16.05.2026)
8. Масштабні лісові пожежі на Луганщині: евакуація жителів. 24 Канал: веб-сайт. URL: https://24tv.ua/masshtabni-lisovi-pozhezhi-luganshhini-zhiteliv-novini-luganska_n1426160 (дата звернення: 17.05.2026)

9. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Луганській області у 2021 році / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/11/Regionalna-dopovid-Luganskoyi-obl.-u-2021.pdf> (дата звернення: 17.05.2026)
10. Study of forests fires in Ukraine as a consequence of military actions according to remote earth sensing data. URL: https://www.researchgate.net/publication/390228673_Study_of_forests_fires_in_Ukraine_as_a_consequence_of_military_actions_according_to_remote_eart_h_sensing_data (дата звернення: 17.05.2026).
11. Пожежі в екосистемах: ситуація у лісах Держлісагентства. Державне агентство лісових ресурсів України: веб-сайт. URL: <https://forest.gov.ua/news/pozhezhi-v-ekosystemakh-sytuatsiia-u-lisakh-derzhlisahentstva> (дата звернення: 17.05.2026).
12. European Forest Fire Information System. Copernicus: веб-сайт. URL: <https://www.copernicus.eu/en/european-forest-fire-information-system> (дата звернення: 17.05.2026).
13. European Forest Fire Information System. IAFC: веб-сайт. URL: <https://www.iafc.org/topics-and-tools/resources/resource/european-forest-fire-information-system> (дата звернення: 17.05.2026)
14. Recommended Practice: Burn Severity. Step by Step: QGIS and Sentinel-2. UN-SPIDER: веб-сайт. URL: <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/Step-by-Step/QGIS-sentinel2> (дата звернення: 17.05.2026).
15. Національний фонд досліджень України: веб-сайт. URL: https://nrfu.org.ua/wp-content/uploads/2022/01/2020.01_0268_kussul_083_01.2020_zz-1-stysnuto.pdf (дата звернення: 17.05.2026).

16. What are the band designations for the Landsat satellites? USGS: веб-сайт. URL: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites> (дата звернення: 17.05.2026).
17. Sen2Cor for Sentinel-2. National Open Eccess Monitor Ireland. URL: <https://oamonitor.ireland.openaire.eu/national/search/publication?pid=10.1117/%2F12.2278218> (дата звернення: 04.06.2026).
18. ArcGis Pro. Esri. URL: <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
19. Sentinel-2A, 2B. Геопросторове агенство Іннотер. URL: <https://innoter.com/sputniki/sentinel-2a-2b/> (дата звернення: 13.05.2026).
20. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation: Remote Sensing. *Read the Docs*. URL: https://semiautomaticclassificationmanual-v6.readthedocs.io/uk-ua/latest/remote_sensing.html (дата звернення: 21.05.2026).
21. Histogram stretching. *ArcGIS Pro Documentation*. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/help/data/imagery/histogram-stretching.htm> (дата звернення: 22.05.2026).
22. Павлович Г. М. Напіваавтоматичне оцифрування гідрологічних об'єктів з допомогою QGIS 3.34. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія* : матеріали наук. конф. Чернівці : ЧНУ ім. Юрія Федьковича, 2024. С. 55–56. URL: <https://archer.chnu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/11586/%D0%9F%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87%20%D0%93.%D0%9C..pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата звернення: 21.05.2026).
23. A Relative Radiometric Normalization Method for Enhancing Radiometric Consistency of Landsat Time-Series Imageries / [authors]. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, no. 12. P. 3120. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15123120>. URL: https://www.researchgate.net/publication/371828441_A_Relative_Radiometric

Normalization Method for Enhancing Radiometric Consistency of Landsat Time-Series Imageries (дата звернення: 11.06.2026).

24. Copernicus Data Space Browser. *European Space Agency*. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> (дата звернення: 21.05.2026).
25. Sentinel-2 MSI: Level-2A Products. *Sentinel Online. European Space Agency*. URL: https://sentinels.copernicus.eu/data-products/-/asset_publisher/fp37fc19FN8F/content/id/4715416 (дата звернення: 21.05.2026).

ДОДАТКИ

Карта просторового розподілу лісових згарищ Кремінського району 2020 року



Легенда

- Лісовий фонд Кремінського району
Межа Кремінського району
- Ступінь пошкодження лісу
- Низький ступінь
 - Середній ступінь
 - Високий ступінь

Ступінь	Площа, га
1	1325,34
2	163,27
3	37,48



0 5 10 20 Км

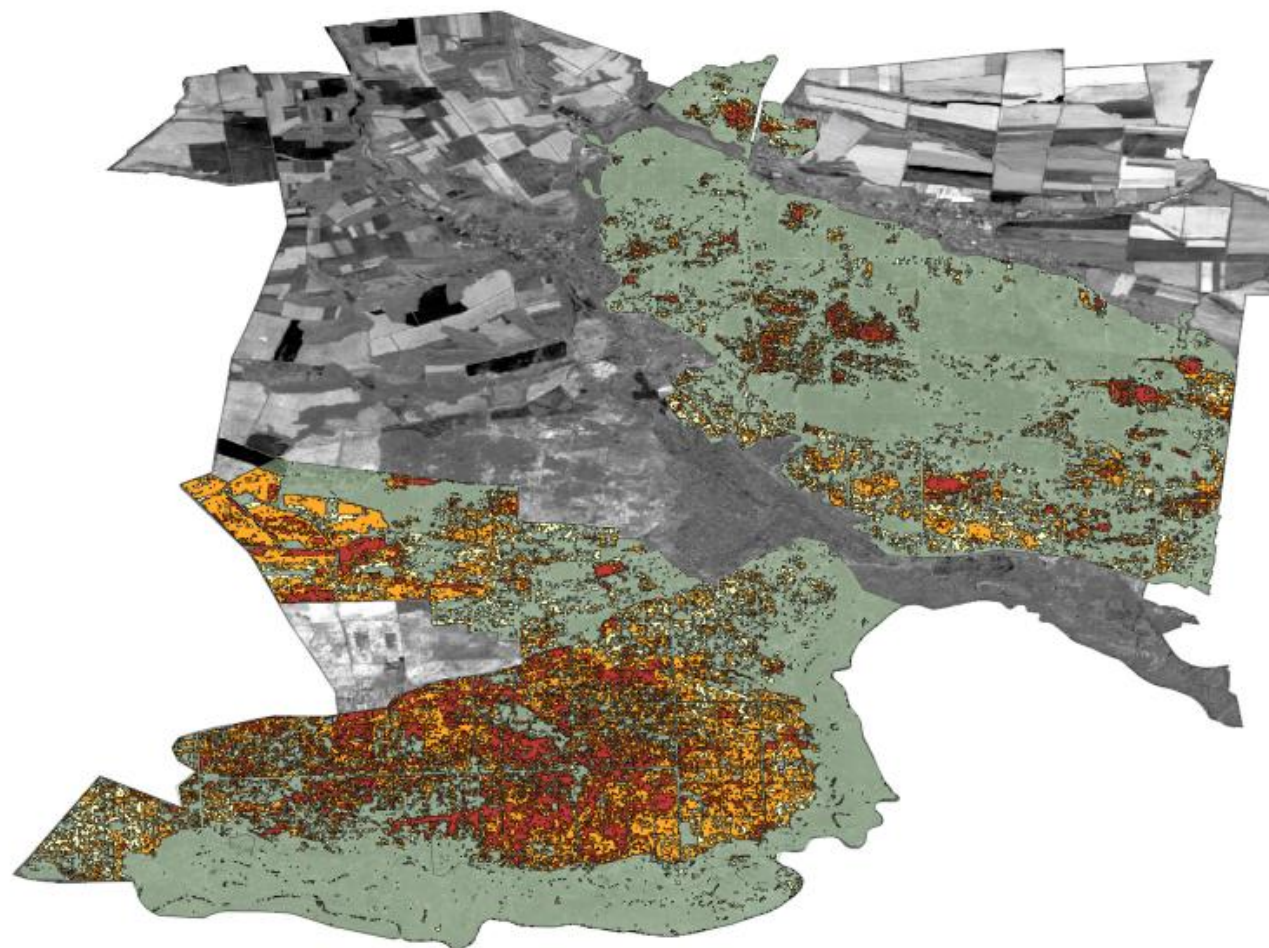
Карта просторового розподілу лісових згарищ Кремінського району 2021-2024 року



Легенда

- Лісовий фонд Кремінського району
Межа Кремінського району
Ступінь пошкодження лісу
Низький ступінь
Середній ступінь
Високий ступінь

Ступінь	Площа, га
1	4298,54
2	5130,1
3	2342,96



0 5 10 20 Км