

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІННІ лісового і садово-паркового господарства

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри таксації лісу та
лісового менеджменту**

Андрій БІЛОУС

_____ (підпис)

_____ (ПІБ)

«02» _____ червня 2025 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Сучасні методи відстеження змін лісового покриву за допомогою даних
дистанційного зондування Землі»

Спеціальність _____ **205 – Лісове господарство** _____
(код і назва спеціальності)

Гарант освітньої програми

Канд. с.-г. наук, доцент

_____ (науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Пузріна Н.В.

_____ (ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Д. с.-г. н., проф.

_____ (науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Миронюк В.В.

_____ (ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Цибаровський В.В.

_____ (ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	7
1.1. Технології ДЗЗ, сенсори та платформи	7
1.2. Методи виявлення змін в лісовому покриві	14
1.3. Глобальні карти змін у лісах	17
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ	23
2.1. Характеристика лісового фонду	23
2.2. Методи збору польових даних	27
2.3. Характеристика супутникових знімків	30
РОЗДІЛ 3. ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ДЗЗ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЗМІН ЛІСОВОГО ПОКРИВУ	34
3.1. Виявлення суцільних втрат лісового покриву за супутниковими знімками	34
3.2. Особливості виявлення часткових втрат лісового покриву	41
3.3. Перспективи моніторингу динаміки лісів за допомогою даних дистанційного зондування Землі	48
ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	52

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота присвячена дослідженню змін лісового покриву за допомогою даних ДЗЗ. Дослідження ділянок проводилося в Чернігівській області на території Остерського лісництва Чернігівського надлісництва філії «Північний лісовий офіс» ДП «Ліси України».

У першому розділі наведено огляд літератури щодо історичних аспектів розвитку технологій дистанційного моніторингу лісів, зроблено характеристику сучасних супутників та сенсорів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які використовуються під час моніторингу лісів. Також у розділі представлено методи виявлення змін в лісах, які базуються на використанні різні спектральних показників ДЗЗ.

У другому розділі зроблено характеристику об'єкта бакалаврської роботи, визначено фактори, які впливають на зміну лісового покриву та описано методику збору даних для роботи. Також у розділі описано кліматичні умови території дослідження.

У третьому розділі досліджено зміни лісових насаджень у просторовому аспекті, наведено класифікацію пошкоджень залежно від інтенсивності змін лісового покриву. Для ілюстрації динаміки стану лісового покриву в різні роки створено ряд тематичних карт, на основі яких продемонстровано ефективність методів дистанційного моніторингу змін лісового покриву.

У висновках встановлено особливості моніторингу стану лісів за допомогою оптичних систем ДЗЗ і визначено перспективи вдосконалення використаних підходів.

Ключові слова: Sentinel, супутниковий знімок, вегетаційний індекс, спектральний канал, втрати лісів.

ВСТУП

Актуальність дослідження. Точна оцінка лісових ресурсів передбачає потребу постійного оновлення інформації про поширення, характеристики та стан лісових насаджень. Враховуючи, що ліси розташовуються на значних територіях і постійно зазнають впливу людини чи природних чинників, відстеження змін в лісах відіграє важливу роль для одержання точної інформації про лісові ресурси.

Для ефективного управління лісовими ресурсами активно впроваджуються технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Використання супутникових знімків для дослідження лісів є ефективним, оскільки технології ДЗЗ постійно розвиваються та мають переваги над наземними підходами: доступність, оперативність отримання даних та незалежність від суб'єктивних оцінок. Важливою перевагою таких даних є можливість поєднання з результатами польових досліджень, що робить їх надійним інструментом для створення якісних картографічних продуктів. Крім того, дані ДЗЗ ефективно застосовуються для раціонального використання лісових ресурсів та охорони довкілля. Регулярний моніторинг дозволяє оцінити динаміку втрат лісового покриву в результаті лісових пожеж і впливу антропогенних факторів. Супутникові знімки також є цінним джерелом інформації для визначення таксаційних характеристик лісового фонду, що сприяє впровадженню дистанційних технологій під час інвентаризації лісових ресурсів.

Найбільш цінними технології ДЗЗ є для неперервного моніторингу змін лісового покриву, які відбувається під впливом численних факторів. Наприклад, сучасні методи цифрової обробки матеріалів супутникової зйомки забезпечують чіткі в просторовому відношенні оцінки пошкоджень, які доповнюються відповідними картографічними матеріалами. Для ефективного використання технологій дистанційного моніторингу потрібно виконати натурні дослідження. Це дозволить відкалібрувати автоматизовані алгоритми для конкретних умов

території та одержати якісні картографічні матеріали про стан лісів і динаміку різних порушень.

Мета роботи полягає узагальнення методів визначення пошкоджень лісових насаджень на основі технологій ДЗЗ.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі **завдання**:

1. Узагальнити методи дистанційного моніторингу лісів.
2. Зібрати дослідний матеріал про різні види порушень на території Остерського лісництва Чернігівського надлісництва філії «Північний лісовий офіс» ДП «Ліси України».
3. Обґрунтувати методи ідентифікації різних типів пошкоджень лісових за супутниковими знімками Sentinel 2.
4. Продемонструвати ефективність алгоритмів автоматизованого виявлення пошкоджень, розробивши відповідні тематичні карти.

Методи дослідження. Для виконання завдань бакалаврської роботи використовувалися методи польового збору даних та комп'ютерної обробки супутникових знімків. Під час збору даних про пошкодження використано методи вибіркового дослідження. Дешифрування пошкоджень виконано за допомогою алгоритмів порогової класифікації.

Об'єктом дослідження є лісові ділянки, які зазнали змін лісового покриву Остерського лісництва Чернігівського надлісництва філії «Північний лісовий офіс» ДП «Ліси України».

Предмет дослідження – методи ідентифікації змін лісових насаджень за супутниковими знімками.

Інформаційною базою дослідження слугувало алгоритмічне забезпечення для класифікації пошкоджень лісових насаджень.

Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні порогових значень вегетаційних індексів для класифікації різних видів порушень лісового покриву.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості опрацювання систем для автоматизованого виявлення змін у лісових насаджень, зумовлених різними чинниками.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Технології ДЗЗ, сенсори та платформи

Витоки використання дистанційних методів дослідження сягають 1858 року, тобто з моменту винайдення фотоапарата та перших спроб фотографування земної поверхні. Надалі ці технології почали застосовувати з бортів літальних апаратів, а в період Першої світової війни аерофотознімання набуло широкого поширення. Саме в цей час сформувалася фотограмметрія – наукова галузь, яка забезпечує отримання кількісних характеристик об'єктів на основі фотознімків, що стало можливим завдяки створенню відповідного технічного забезпечення. Аерознімки почали використовуватись у топографічному картографуванні, ґрунтознавстві, лісовому та сільському господарстві, геологорозвідці та інших сферах [1].

Термін «дистанційне зондування Землі» (ДЗЗ) увійшов у науковий обіг на початку 1960-х років, коли традиційне поняття «аерофотознімання» вже не охоплювало нові методи отримання інформації, зокрема з використанням електромагнітного випромінювання за межами видимого спектра. Подальший розвиток був зумовлений запуском супутників дистанційного зондування. Першим спеціалізованим супутником для отримання даних про земну поверхню став ERTS-1, виведений на орбіту у 1972 році (згодом перейменований на Landsat-1). У 1984 році при Організації Об'єднаних Націй було створено Комітет із супутникового спостереження Землі (CEOS), а згодом ухвалено «Принципи космічного дистанційного зондування Землі», які визначають базові принципи і правові засади міжнародної взаємодії в цій галузі. До складу CEOS входять національні космічні агентства та наукові установи провідних країн світу, зокрема Європейського Союзу, США, Канади, Індії, Японії, Китаю, а також Національне космічне агентство України [1].

Сьогоднішній стан досліджень природного середовища багато в чому зумовлений використанням супутників для дистанційного моніторингу Землі,

що забезпечують постійне оновлення високоякісних геопросторових даних. Серед найпопулярніших платформ для екологічного моніторингу виділяється серія супутників Landsat, яка збирає дані про стан Землі з середини 1970-х років. Іншою важливою системою спостереження є європейська програма Copernicus, що складається з серії супутникових місій Sentinel. Кожен із супутників має чітко визначену функціональну спеціалізацію. Найбільш важливий для лісового моніторингу є супутники Sentinel 2 (зображено на рис 1.1).

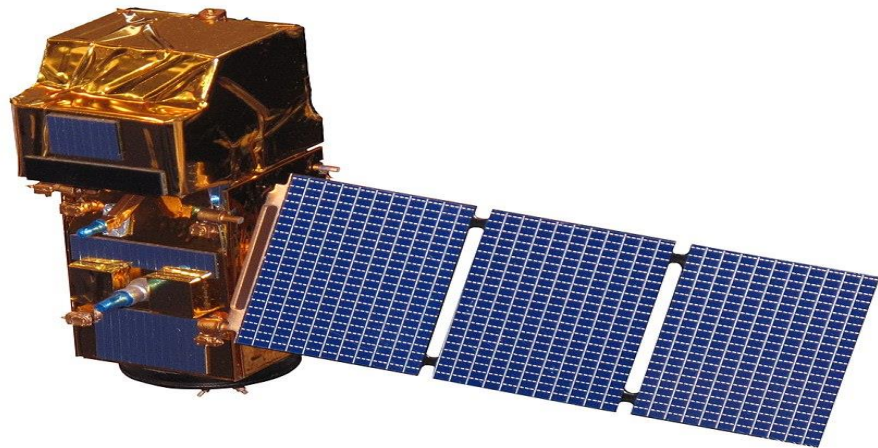


Рис. 1.1. Супутник Sentinel 2A з просторовим розрізненням спектральних каналів 10–20 м

Sentinel 2 забезпечує дані в видимому та інфрачервоному режимах, що відкриває можливості для аналізу стану рослинності, лісових масивів та ґрунтового покриву. Також є інші місії, такі як Sentinel, що здійснює радарне дослідження земної поверхні. Це дозволяє отримувати інформацію незалежно від погодних факторів та часу доби, що є особливо важливим для оперативного реагування на надзвичайні ситуації. Sentinel 3 зосереджується на спостереженні океанів, надаючи дані про температуру поверхні води, її колір та рівень моря. Важливо, що всі дані місій Sentinel є відкритими та доступними для наукової та прикладної діяльності [13]. Характеристика супутника наведена у таблиці 1.1.

Технічні характеристики Sentinel-2A

Характеристика	Значення
Організація	Європейське космічне агентство
Дата запуску	23 червня 2015
Орбіта	Сонячно-синхронна, 786 км, нахил 98,6°
Період обертання	100,6 хв
Інструмент	MSI (Multi Spectral Instrument), 13 смуг
Спектральний діапазон	Видимий, ближній ІЧ, Короткохвильовий ІЧ
Просторове розрізнення	10м (4 смуги), 20м (6 смуг), 60м(3 смуги)
Ширина смуги захвату	290 км
Період повторного покриття	5 днів
Основне застосування	Рослинність, ґрунти, водойми, ліси

Надзвичайно важливими для моніторингу лісів залишаються супутники Landsat. У 2013 році був виведений на орбіту супутник Landsat 8 (зображений на рис. 1.2), а в 2021 році – Landsat 9.



Рис. 1.2. Супутник Landsat 8 на навколосемній орбіті з просторовим розрізненням розрізнення 30 м

Цей супутник обладнаний вдосконаленими мультиспектральними приладами, що забезпечують зйомку з високою деталізацією, що є ключовим для відстеження стану рослинності, змін в ландшафтах, водних масивів та міських

зон. Його висока радіометрична точність та систематичний 16-денний режим зйомки створюють можливість для тривалих спостережень за лісовими системами в часі [23]. Характеристика цього супутника наведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Характеристика Landsat 8

Характеристика	Значення
Організація	NASA/USGS
Дата запуску	11 лютого 2013
Орбіта	Сонячно-синхронна, 705 км, нахил 98,2°
Період обертання	98,8 хв
Інструменти	OLI (9 смуг), TIRS (2 теплові смуги)
Спектральний діапазон	Видимий, ближній ІЧ, короткохвильовий ІЧ, тепловий ІЧ
Просторове розділення	15 м (панхром), 30 м (мультиспектр), 100 м (теплові)
Ширина смуги захвату	185 км
Період повторного покриття	16 днів
Основне застосування	Ліси, сільське господарство, клімат, вода

Використання дистанційних засобів збору даних має ряд ключових переваг: по – перше, воно забезпечує широку оглядовість, дозволяючи отримати інформацію про великі простори одночасно. По – друге, даний метод дозволяє перейти від фрагментарної картини показників стану довкілля, отриманої в окремих точках, до більш детальної та повноцінної картини, що охоплює всю досліджувану територію [1].

Перші способи використання аерофотознімання для потреб інвентаризації лісових ресурсів та аналізу умов їх промислового використання, які здійснювались ще до початку Другої світової війни, продемонстрували високу ефективність цього методу. Аерофотознімання виявилось дієвим інструментом, що суттєво прискорює процес дослідження лісового фонду, а також підвищує ефективність лісовпорядних робіт. На сучасному етапі ЛЗЗ, що здійснюється з космічних і авіаційних платформ, посідає провідне місце серед технологій, які активно впроваджуються в розвинених країнах. Це обумовлено тим що ДЗЗ дає

зможу реалізовувати широкий спектр прикладних задач у сотні або навіть тисячі разів оперативніше й економічніше, ніж за допомогою традиційних методів. На сьогодні день супутникові знімки широко застосовуються для інвентаризації сільськогосподарських земель, картографування землекористування, моніторинг стану лісу, лісової рослинності. Крім того, вони є важливим інструментом у сфері територіального планування та управління міською й муніципальною інфраструктурою. Значним є також розвиток комерційного сегменту, пов'язаного з використанням даних ДЗЗ: зростає обсяг реалізації зображень, розширюються спектр послуг з їх інтерпретації та обробки, розвивається ринок програмного забезпечення. Загалом обсяг світового ринку ДЗЗ оцінюється приблизно в 3 мільярди доларів США [1].

Практичні всі ключові завдання у сфері лісового господарства, зокрема інвентаризація лісових ресурсів, їх охорона, протидія незаконним рубкам та екологічним порушенням, потребують своєчасної, достовірної та детальної інформації про стан лісів. Топографічні карти оновлюються нечасто – приблизно один раз на десятиліття, вони зазвичай охоплюють обмежені території та є малодоступними для користувачів. У цьому контексті особливої актуальності набувають матеріали аерокосмічного знімання, які надають актуальну та просторово повні відомості про лісовий покрив [1].

Аерофотознімки, а нині також супутникові знімки, широко застосовується під час лісовпорядкування для отримання таксаційних характеристик насаджень. Для організації та ефективного ведення лісгосподарської та лісопромислової діяльності необхідно визначати низку показників для кожної окремої ділянки: видовий склад деревостанів, середні діаметри стовбурів, висоту та вік насаджень, повноту, запас та якість деревини, тип лісу або тип місцезнаходження. Важливим також є аналіз стану підросту, підліску, ґрунтового покриву, умов росту деревостанів, а також формування заходів щодо догляду, рубок, лісовідновлення, захисту лісів від пожеж та шкідників тощо. Значну роль аерофотознімання, а в сучасних умовах – космічного знімання, відіграють на етапі проектно-пошукових робіт. Ще на стадії підготовки до проведення досліджень

аерознімальні матеріали дозволяють здійснити попереднє планування, зокрема розробити схеми транспортної інфраструктури в межах лісових масивів і визначити оптимальні траси основних та під'їзних доріг [1].

У системах дистанційного зондування (ДЗЗ) застосовуються два основні класи сенсорів, які зображено на рис. 1.3.

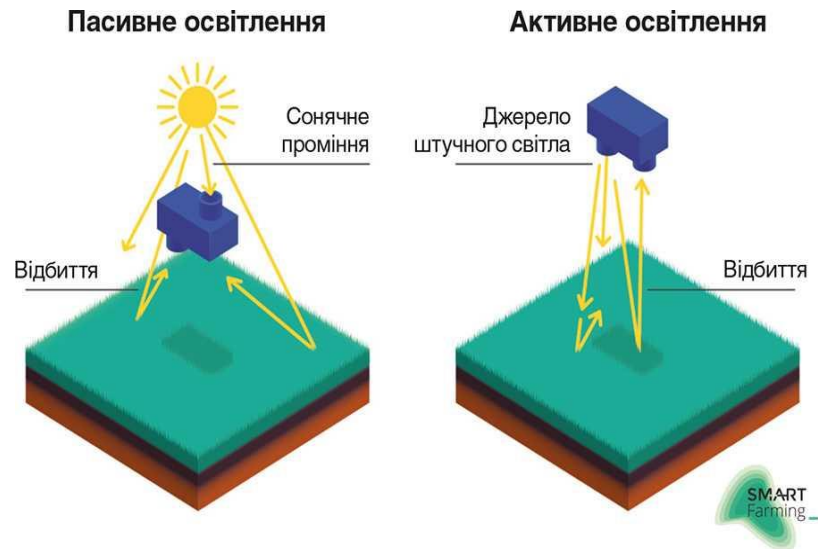


Рис. 1.3. Основні типи сенсорів у системах дистанційного зондування: пасивні та активні сенсори [7]

Пасивні сенсори виявляють природне випромінювання, яке відбивається або випромінюється об'єктами. Ці датчики використовуються для спостереження за станом рослин, ґрунту та водойм. До головних видів безактивних датчиків належать багатоспектральні та гіперспектральні камери, які застосовуються для оцінки біомаси та інших характеристик [27]. Вони обмежені тим, що зібрана інформація пов'язана з особливостями спектру положення Сонця, погодними та кліматичними умовами, а також оптичними властивостями атмосфери та ґрунту [1].

Активні сенсори функціонують за принципом випромінювання власного сигналу та аналізу його відбиття від предметів. Прикладами таких систем є радари (SAR) та LiDAR (Light Detection and Ranging), які забезпечують збір інформації незалежно від атмосферних умов та годинного режиму [6].

Висока точність активних методів обумовлено низьким розсіюванням лазерного випромінювання, що забезпечує ефективне передавання енергії на значні відстані. Їх відрізняє підвищена чутливість та краща просторова роздільна здатність. Однак, активні методи мають значну вартість. Можливо реалізувати реєстрацію флуоресцентної індукції під час дистанційного вивчення рослин, а проблема адаптації в темряві можна подолати за допомогою нічного опромінення рослин лазером. Сьогоднішні дистанційні методи дослідження використовують різноманітні пристрої, починаючи від портативних приладів і платформ, аж до літаків і супутників [1].

Дослідження Smooth та Brown (2024), опубліковане в журналі *Remote Sensing*, підтверджує високу точність активних сенсорів, таких як SAR, у визначенні структури лісів, навіть при густому хмарному покритті або в нічний час [27].

LIDAR, про активний метод дистанційного зондування, використовує лазерні імпульси для визначення відстані до об'єктів. Випромінюючи лазерні промені, які відбиваються від земної поверхні або об'єктів, а потім реєструючи час повернення сигналу, система генерує точні тривимірні зображення місцевості та об'єктів [21].

Використання в дослідженні лісів:

– визначення лісової структури: технологія LiDAR забезпечує точні вимірювання висоти дерев, густоти крони та інших структурних параметрів, що необхідні для визначення обсягу біомаси та накопичення вуглецю в лісових екосистемах [29];

– LiDAR є потужним інструментом для відстеження змін у лісовому покриві, включаючи вирубку лісів, лісові пожежі та зусилля з лісовідновлення [22].

LiDAR – це технологія дистанційного зондування з великим потенціалом застосування в управлінні лісовими ресурсами. Вона забезпечує високу точність вимірювань, яку можна використовувати для вимірювання дерев і деревостанів.

1.2. Методи виявлення змін в лісовому покриві

Системи дистанційного зондування Землі знайшли широке застосування у моніторингу змін у лісових екосистемах. Ці зміни можуть бути наслідком як природних явищ, так і антропогенного впливу. Регулярне оновлення супутникових даних відкрило шлях до детального вивчення просторово- часової динаміки рослинного покриву. Ключовим інструментом такого аналізу є вегетаційні індекси. Їх розрахунок ґрунтується на аналізі відбиття світла у певних спектральних діапазонах, зокрема, у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах.

Одним з найуживаніших інструментів для оцінки стану рослинності є NDVI (нормалізований різницевий вегетаційний індекс). Цей індекс дає змогу виміряти стан зеленої рослинності та активність їх фотосинтезу. Діапазон значень NDVI коливається від -1 до +1, де вищі показники вказують на густу та активну рослинність. Sorpin та Bauer (1996) стверджують, що цей індекс є ефективним інструментом для виявлення змін в лісовому покриві як у просторі, так і в часі, використовуючи аналіз супутникових зображень, знятих в різні періоди. До ключових підходів відносяться порівняння класифікованих знімків та аналіз коливань значень індексу між різними моментами спостереження [31].

Для розрахунку NDVI використовується формула

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red}, \quad (1.1)$$

де NIR (Near-Infrared) – відображає ступінь відбиття світла в області ближнього інфрачервоного діапазону. Здорове рослинне покриття характеризується високим рівнем відбиття світла в цьому спектральному діапазоні; Red – відповідає відбиванню світла в червоному діапазоні спектру. Рослини активно поглинають світло в червоній області спектра для здійснення процесу фотосинтезу завдяки хлорофілу.

NDVI використовує відносну різницю між відбиттям світла в ближньому інфрачервоному (NIR) та червоному (Red) діапазонах, розраховуючи її відношення до їхньої суми:

– здорова рослинність відрізняється високим значенням NIR (за рахунок відбиття клітинної структури листя) та низьким значенням Red (за рахунок поглинання пігменту хлорофілу); ця особливість призводить до значної позитивної різниці між NIR та Red, а сумарне значення (NIR + Red) також буде відчутно високим, унаслідок цього, NDVI буде наближатися до одиниці;

– відсутність або недостатність рослинності (наприклад, водойми, ґрунт, забудовані ділянки) призводять до подібних показників відбиття в обох діапазонах; Різниця (NIR - Red) буде мінімальною або навіть матиме негативний характер (наприклад, у випадку з водою), що спричинить NDVI значення близько до нуля або навіть від'ємні.

Значення в діапазоні від -1 до 0, зазвичай притаманні таким типам земельного покриття, як вода та сніг. Вода може мати негативні значення, оскільки її відбиваність у видимому діапазоні вища, ніж у NIR – діапазоні. Значення близько 0 зустрічаються на незайманих ділянках з оголеною землею або з дуже скудним рослинним покривом. У діапазоні від 0 до 1 цей індекс показує наявність рослинності. Чим вище NDVI, тим густіше та здоровіше рослинний покрив.

Подібний індекс EVI (індекс покращеної рослинності) виявляє підвищену чутливість до густого зростання рослин, ефективніше долає атмосферні перешкоди та дає надійні результати при великій біомасі. Цей індекс особливо корисний для дослідження екосистем з високою щільністю рослинності, таких як тропічні ліси [31].

Важливим вегетаційний індекс є також NBR (нормалізований індекс вигорання), який широко використовується для ідентифікації та оцінки площ, що зазнали пошкоджень від пожеж. Визначення ґрунтується на аналізі спектральних відмінностей у ближньому та короткохвильовому ІЧ-діапазонах, що забезпечує точне виявлення зон, що зазнали згоряння [31].

Для розрахунку NBR використовується така формула:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}, \quad (1.2)$$

де NIR – близький інфрачервоний діапазон; SWIR – короткохвильовий інфрачервоний діапазон.

Зниження рівня NIR спостерігається внаслідок пошкодження рослинності. SWIR сигнал посилюється через те, що попіл та згорілі рештки відрізняються високими показниками відбиття у діапазоні SWIR.

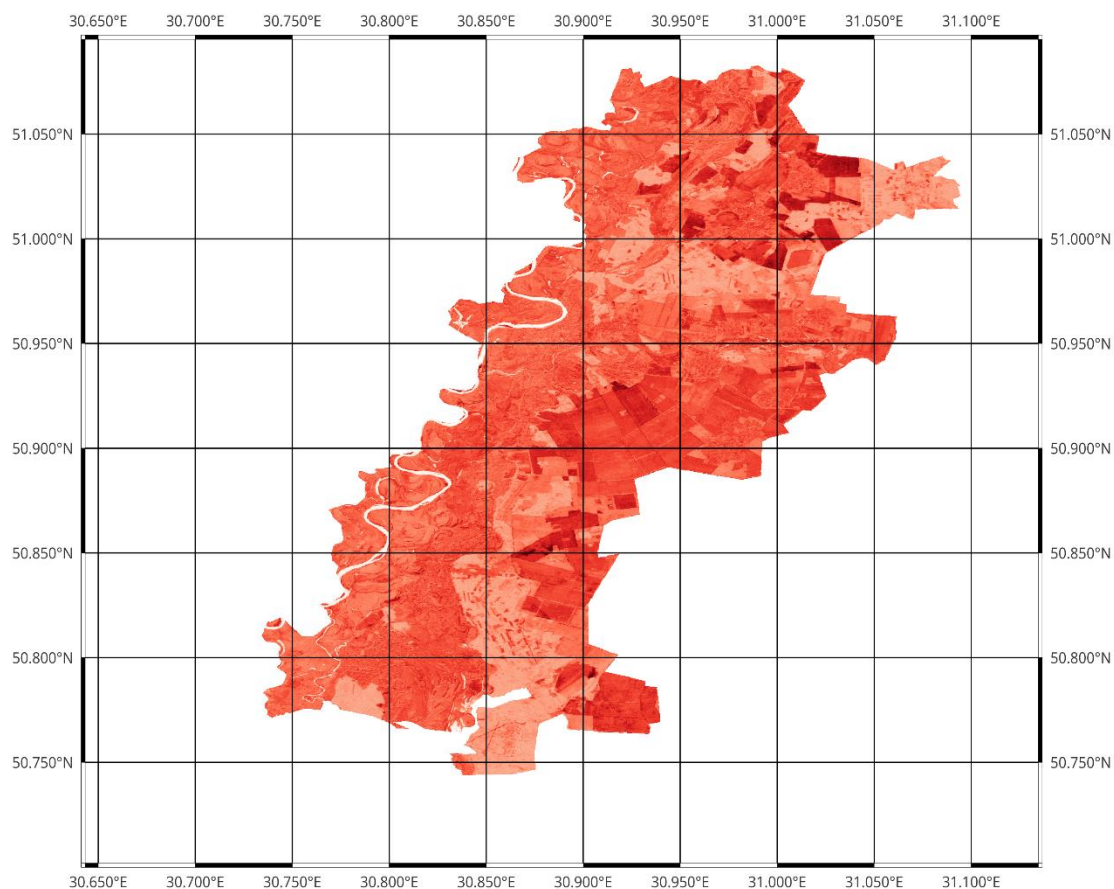


Рис. 1.4. Індекс NBR, розрахований для території дослідження за знімком Sentinel 2 станом на 2017 рік

1.3. Глобальні карти змін у лісах

У сфері досліджень глобального лісового моніторингу, дослідження М. Хансена та його команди (2013) виділяється своїм глибоким аналізом змін лісового покриття планети з 2000 по 2012 рік. Для створення повномасштабних карт цих змін автори використали високоякісні дані супутників Landsat, що дозволило виявити як значні зміни в розмірах лісів, так і динаміку їхнього зростання та відновлення на глобальному рівні. На сучасному етапі продукт постійно оновлюється так, щоб охопити останні роки.

Дослідження привело до створення карт, що демонструють зміни в розподілі лісів, збільшення площ лісових масивів та зміни щільності їх зростання на стартовому етапі дослідження. Ці дані стали основою для численних досліджень в галузі екології, а також для розробки методів моніторингу лісів, які інтегруються в глобальні платформи, наприклад, Global Forest Watch [18]. За допомогою Global Forest Watch можна визначати скільки лісового покриття було втрачено з 2001 по 2024 рік, або навпаки – відновилося.

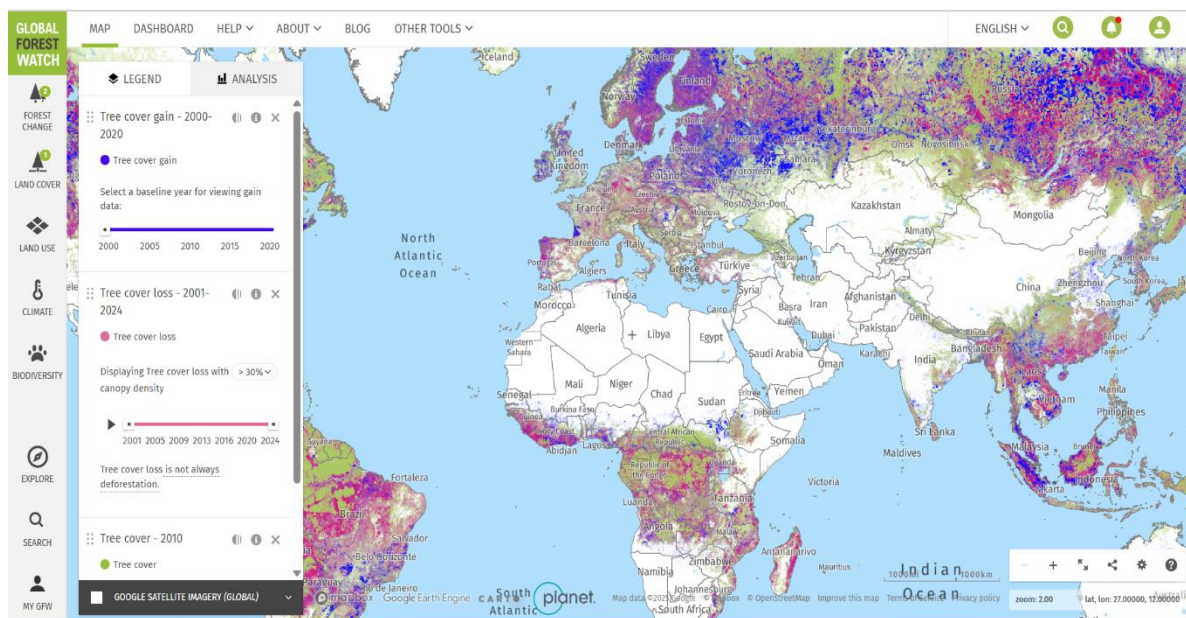


Рис. 1.5. Загальний вигляд карти GFC (посилання на ресурс: <https://www.globalforestwatch.org/map>)

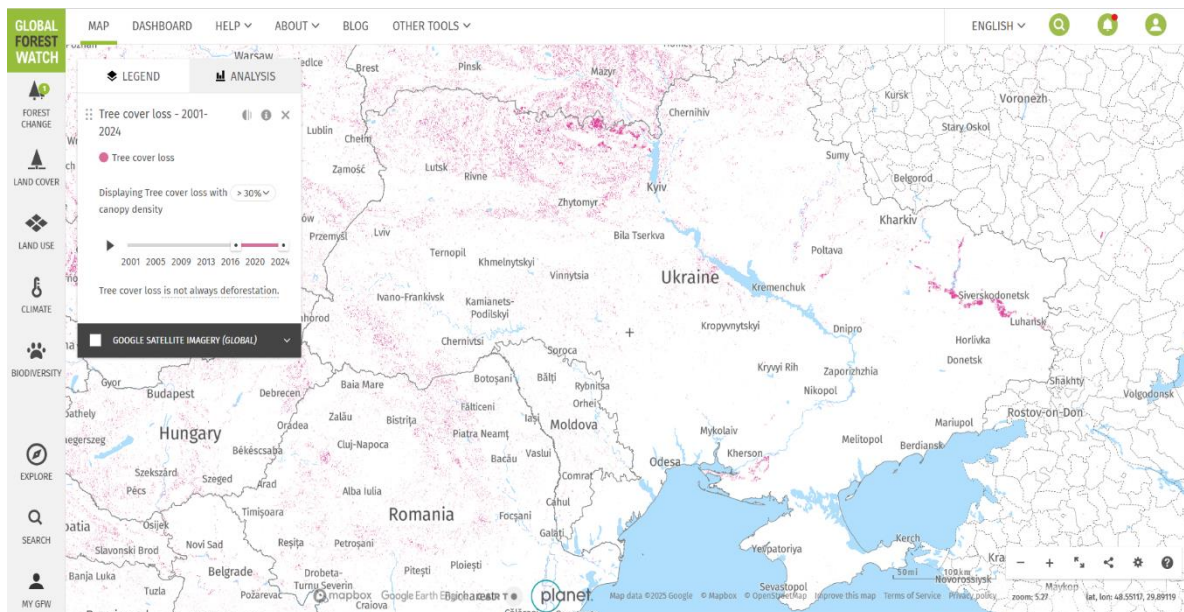


Рис. 1.6. Аналіз втрат лісового покриття з 2017 по 2024 роки

Глобальна карта GFC є досить зручною для аналізу втрат лісового покриття для обраної області інтересу. Наприклад, на рис. 1.7 зображено пошкодження лісових насаджень, зафіксовані для території дослідження.

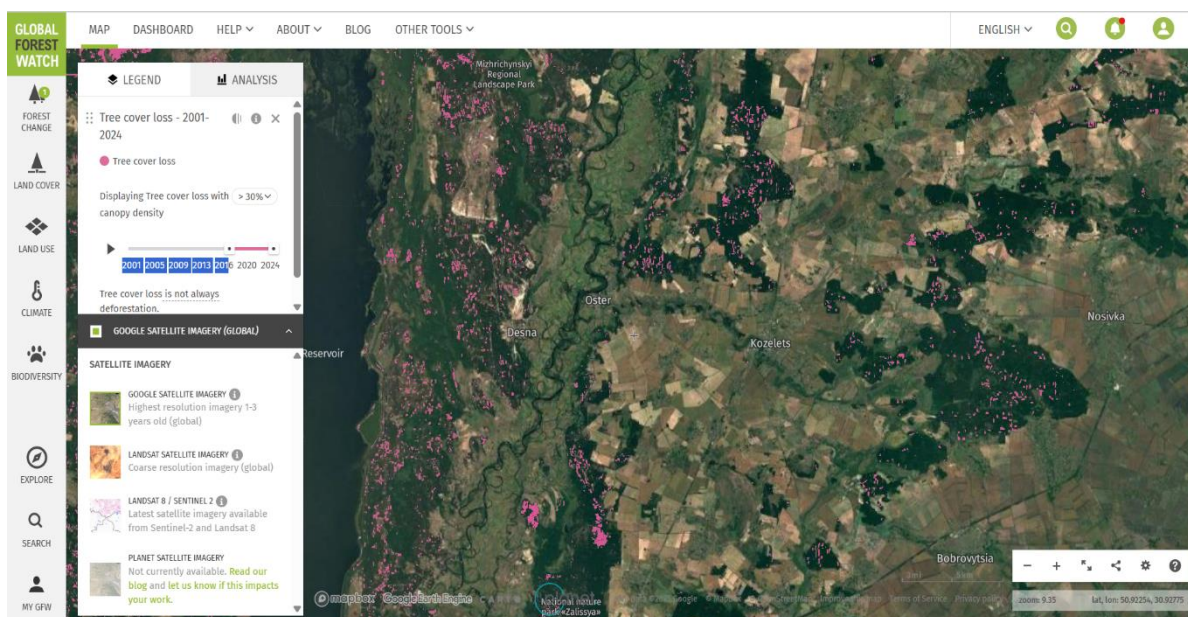


Рис. 1.7. Аналіз втрат лісового покриття за допомогою карти GFC в області інтересу з 2017 по 2024 роки

Виявлення відновлення лісів за допомогою карти GFC має свої особливості. Передусім, відновлення лісів виявляється набагато складніше та з певним запізненням. У зв'язку з цим результати моніторингу лісів за допомогою карти частіше вказують на більші втрати лісів, ніж відновлення (рис. 1.8).

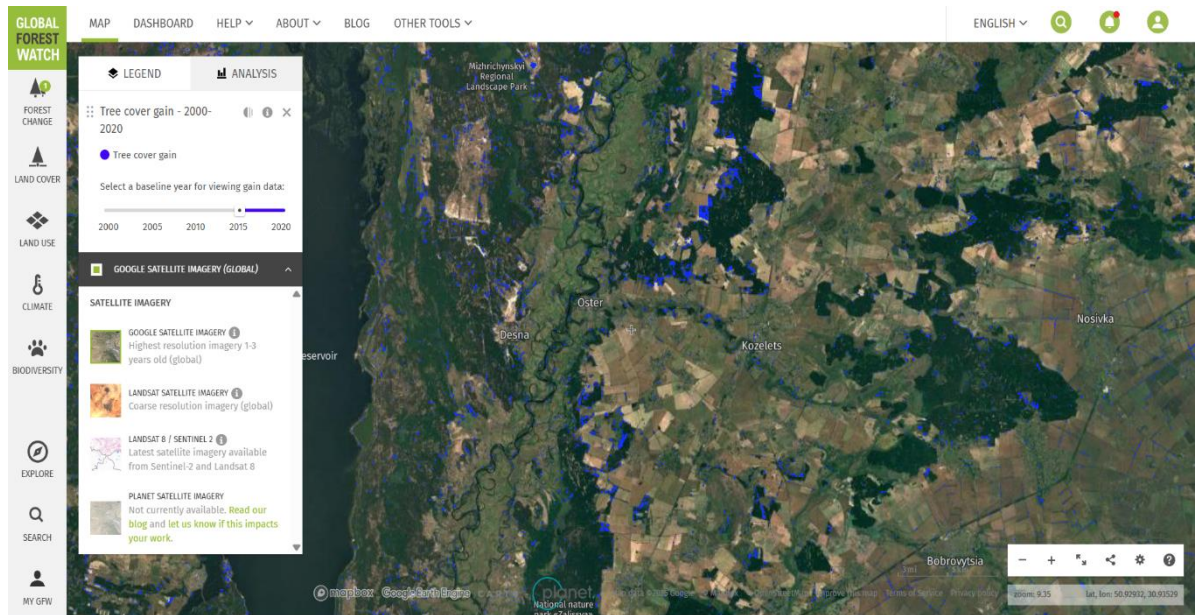


Рис. 1.8. Аналіз приросту лісового покриття з 2015 по 2020 роки

У квітні 2025 року Європейський Союз запустив у космос супутник Biomass, обладнаний радарною системою з синтезованою апертурою, яка працює в Р-діапазоні. Основною функцією цього супутника є моніторинг маси деревини в лісах по всьому світу, що дозволить оцінити обсяги вуглецю, що зберігається в деревині, та аналізувати зміни в структурі лісів, особливо в тропічних і важкодоступних регіонах. Biomass виконує роль доповнення до існуючих проєктів, таких як NASA GEDI, забезпечуючи більш глибоке розуміння організації лісів [14].

Модуль швидкої оцінки збитків (Rapid Damage Assessment, RDA) у складі Європейської системи інформації про лісові пожежі (European Forest Fire Information System, EFFIS) було впроваджено у 2003 році з метою оперативного картографування вигорілих територій у період пожежонебезпечного сезону. Основою для створення карт стали супутникові знімки MODIS з просторовою роздільною здатністю 250 м, які обробляються щоденно. Зображення

отримуються з двох супутників – TERRA та AQUA, які проходять обробку протягом декількох годин після надходження [17].

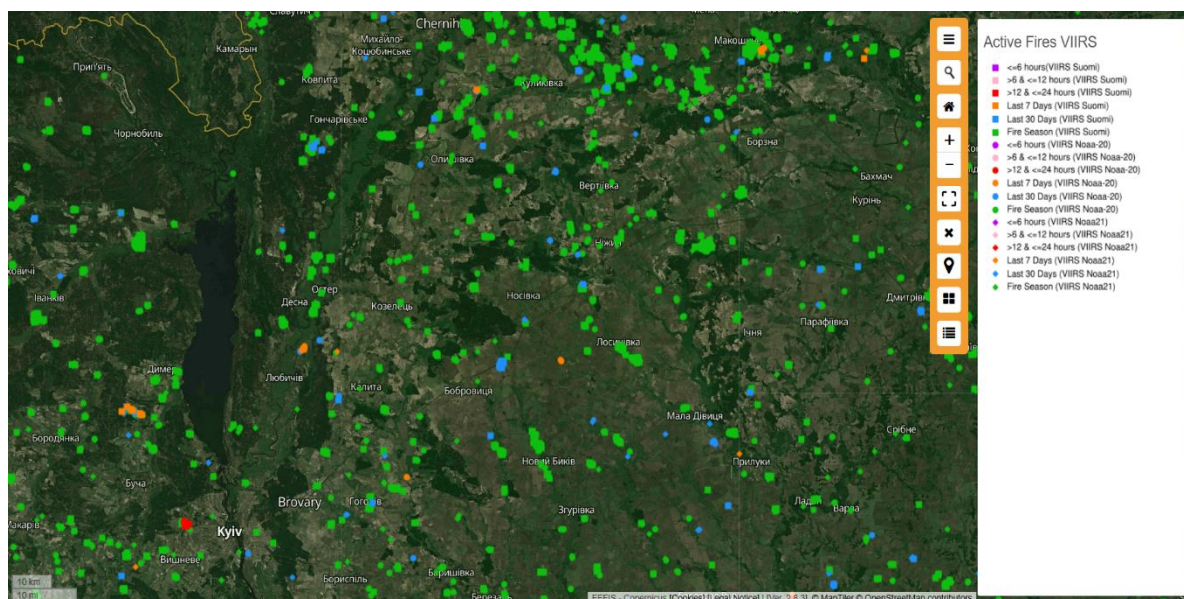


Рис. 1.9. Аналіз пожеж за допомогою EEFFIS – джерело VIIRS (Посилання на ресурс: https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/apps/effis_current_situation/)

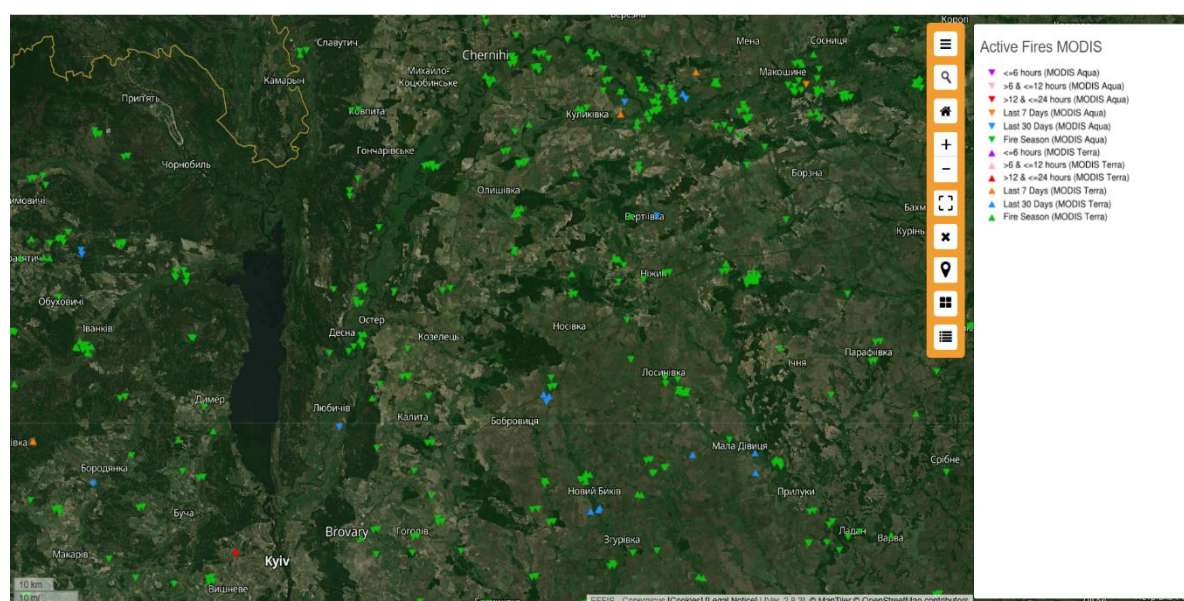


Рис. 1.10. Аналіз пожеж за допомогою EEFFIS – джерело MODIS

У період з 2003 по 2018 рік система EEFFIS забезпечувала щоденне оновлення карт вигорілих територій у Європі для пожеж площею понад 30 га. Починаючи з 2018 року, завдяки залученню супутникових даних Sentinel 2, стало можливим деталізоване картографування ділянок площею менш як 30 га. За

оцінками, карти EFFIS охоплюють приблизно 95 % від загальної площі пожеж, які щорічно трапляються на території ЄС [2].

Процес картографування базується на напівавтоматизованій обробці супутникових знімків MODIS, які доповнюються допоміжними просторовими наборами даних, такими як CORINE Land Cover [9]. Тестування ефективності даних MODIS для створення карт вигорілих територій проводилося у 2000–2002 роках, а перші результати було отримано у 2003 році. До впровадження цієї технології периметри пожеж визначалася лише після завершення пожежного сезону. Після 2003 року обробку даних було автоматизовано, що дозволило здійснювати щоденну генерацію карт для всієї Європи [2].

З 2018 року до процесу долучено зображення Sentinel-2 (роздільність 20 м), що підвищило деталізацію картографування та точність периметрів пожеж [26]. Алгоритм обробки поєднує порогову класифікацію індексів відбиття, тематичні карти земного покриття (CORINE), активне виявлення пожеж за MODIS і VIIRS та зовнішні джерела інформації, такі як повідомлення про пожежі. Попередньо автоматично визначені периметри проходять візуальну перевірку та коригування на основі зображень Sentinel 2 і MODIS [2].

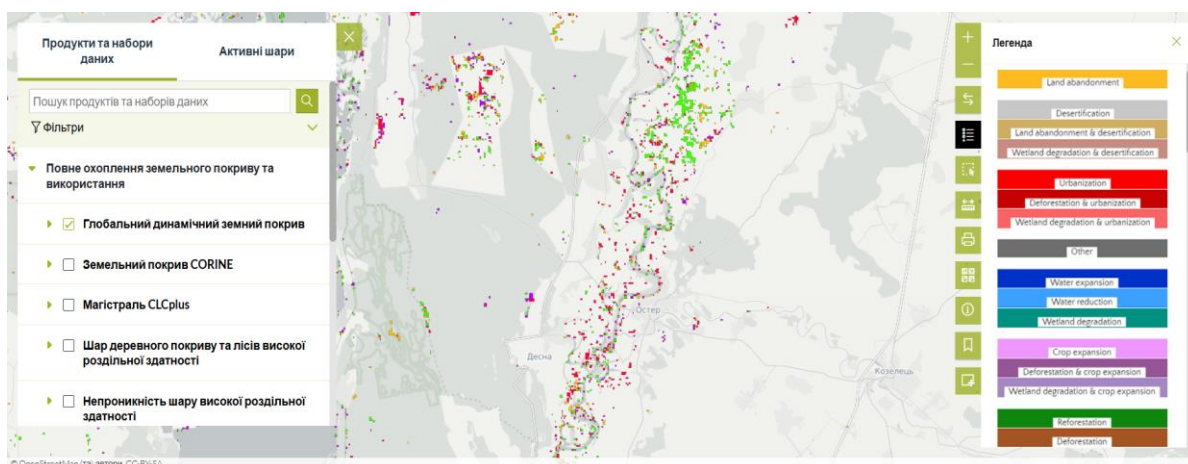


Рис. 1.11 Аналіз динаміки земного покриття за допомогою (<https://land.copernicus.eu/en/map>) з 2016 по 2019 рік

Висновок до розділу 1. У результаті аналізу літературних джерел було зроблено такі висновки:

1. Технології ДЗЗ є ефективним інструментом для моніторингу змін лісового покриву як у глобальному, так і в регіональному масштабі.

2. Нині існують різні платформи (Landsat, Sentinel), сенсори (пасивні, активні), а також відповідні вегетаційні індекси (NDVI, NBR, dNDVI, dNBR), які дозволяють здійснювати моніторинг змін лісових насаджень.

3. Для швидкої оцінки стану змін можуть застосовуватися глобальні карти (Global Forest Change, EFFIS, GFW, Biomass), які забезпечують узагальнену оцінку просторово-часової динаміки лісів.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика лісового фонду

Для виконання бакалаврської роботи в межах Остерського лісництва Чернігівського надлісництва філії «Північний лісовий офіс» ДП «Ліси України» обрано локальну область інтересу, яка використовувалася для перевірки методики дистанційного моніторингу змін лісового покриття. Територія досліджень розташована в Чернігівському районі Чернігівської області, на південно-західній частині області Лівобережної України (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Місцезнаходження території дослідження на карті України

Остерське лісництво площею 4758,6 га входить до складу філії «Північного лісового офісу» та розташоване в східній частині Чернігівського району. Лісові масиви лісництва розташовані на території Українського Полісся. Виходячи з існуючого поділу лісів на категорії, їх функціонального значення, встановленого в них режиму ведення лісового господарства та лісокористування на наступний ревізійний період, поділені на господарські частини:

- ліси природоохоронного, наукового, історико-культурного призначення на рівнині;
- рекреаційно-оздоровчі ліси з особливим режимом користування на рівнині;
- захисні ліси;
- експлуатаційні ліси на рівнині;

Клімат району розташування лісництва має м'які зимові температури, тепле літо та значну кількість атмосферних опадів. Нижче зазначено основні кліматичні показники території дослідження:

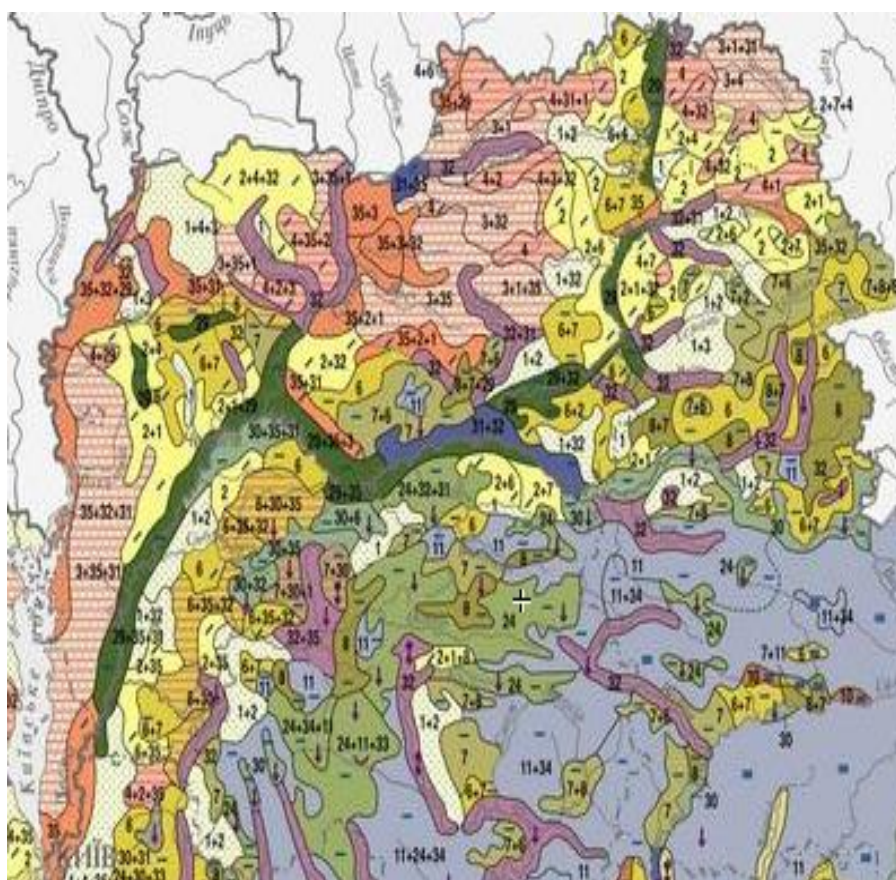
- середньорічна температура повітря складає + 6,4 °С;
- абсолютний максимум досягає + 37 °С;
- обсяг опадів становить 570 мм;
- тривалість вегетаційного періоду – 196 днів;
- останні весняні заморозки спостерігаються наприкінці травня;
- перші осінні заморозки фіксуються наприкінці вересня;
- глибина промерзання ґрунту становить 60 см;
- відносна вологість повітря коливається в межах 70–75 %;

Клімат лісництва дає можливість вирощувати такі деревні види як сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.), ялина європейська (*Picea abies*), дуб звичайний (*Quercus robur* L.), ясен звичайний (*Fraxinus excelsior* L.), береза повисла (*Betula pendula*), вільха чорна (*Alnus glutinosa* (L.) Gaerth.) .

Географічні особливості та водний режим безпосередньо впливають на тип ґрунту. На півночі та північному-заході території розташовані стародавні алювіальні, водно-льодовикові та делювіальні відкладення, поширені дерново-підзолисті оглеїнові ґрунти (глеюваті та глеїнові). Ці ґрунти формуються в умовах низького дренажу та близького стояння підземних вод (на глибині 2–3 метри). Ґрунти, що утворюються на лесоподібних породах, відрізняються за своїм елювіально-ілювіальним типом. Ці ґрунти характеризуються рядом негативних рис, включаючи щільність, неблаготворну структуру, недостатню

аерованість, підвищений рівень кислотності та низьку концентрацію катіонів. На цій території поширені дерново-середньо-підзолисті ґрунти.

Профіль цих ґрунтів чітко демонструє елювіальний та ілювіальний горизонти, при цьому вміст гумусу (0,8–1,3%) відносно низький, а водно-фізичні характеристики позитивні. В цілому, можна визначити ці землі як малородючі. Вздовж річки Десни розташовані лучні ґрунти, що утворилися на теренах, де накопичилися відклади річкових потоків. Ці ґрунти виявляються в низовинах рельєфу, поряд з джерелами прісної води.



ґрунти		Чорноземи типові на лесових породах	
Дерново-підзолисті ґрунти на давньо-алювіальних та водно-льодовикових відкладах		11	Чорноземи типові малогумусні та слабогумусовані
1	Дерново-слабопідзолисті піщані та глинисто-піщані	12	Чорноземи типові середньогумусні
2	Дерново-середньопідзолисті супіщані	Чорноземи звичайні на лесових породах	
Дерново-підзолисті оглеєні (глеюваті та глейові) ґрунти на давньоалювіальних, водно-льодовикових моренних та делювіальних відкладах		13	Чорноземи звичайні глибокі мало- й середньогумусні
3	Дерново-слабопідзолисті оглеєні	14	Чорноземи звичайні середньогумусні
4	Дерново-середньопідзолисті оглеєні	15	Чорноземи звичайні малогумусні
5	Дерново-, середньо- та сильнопідзолисті поверхнево-оглеєні	16	Чорноземи звичайні неглибокі малогумусні
Опідзолені ґрунти переважно на лесових породах		Чорноземи південні на лесових породах	
6	Ясно-сірі та сірі опідзолені	17	Чорноземи південні малогумусні та слабогумусовані
7	Темно-сірі опідзолені	Чорноземи на важких глинах	
8	Чорноземи опідзолені	18	Чорноземи переважно солонцюваті на важких глинах
Реградовані ґрунти переважно на лесових породах		Чорноземи та дернові ґрунти щепенюваті на елювії щільних порід	
9	Темно-сірі реградовані	19	Чорноземи і дернові щепенюваті ґрунти на елювії щільних безкарбонатних порід (пісковиків і сланців)
10	Чорноземи реградовані		

Рис. 2.2. Геологічна карта ґрунтового покриття Чернігівщини

У південних районах Чернігівської області поширені невеликі ділянки опідзолених ґрунтів, що утворилися на лесових ґрунтах. Основну площу займають різні типи чорноземів: малогумусові, слабогумусові та середньогумусові. Ці типи ґрунтів домінують на значній території Лісостепової та Степової зон. Їхній гранулометричний склад змінюється від крупнозернисто-легкосуглинкових на півночі до щільних та глинистих на півдні, що обумовлено їх формуванням на лісових ґрунтах, що покривають міжрічкові тераси та плоскогір'я. Товщина гумусового шару варіюється від 70 до 120 сантиметрів. У малогумусних ґрунтах верхній горизонт містить 3,5–5,5 % гумусу, в середньогумусних – 5,5–6,5 %.

Ці середньогумусові ґрунти поширені в східних областях Лісостепу та Степу. Ґрунтові розчини, зазвичай, нейтральні, хоча іноді виявляється слабка кислотність. Вологість в них нестабільна, піддається значним сезонним і річним коливанням, за винятком Західного Лісостепу, де дефіцит вологи не є проблемою, крім окремих періодів в деякі роки. Ґрунти мають високу потенційну родючість, що робить їх придатними для вирощування широкого спектру культур. По берегах невеликих річок поширені торфові ґрунти та торфовища, які зустрічаються в низинах річищ, на понижених ділянках Полісся та Лісостепу. Нові ґрунтові маси утворюються через змішування з мінеральними ґрунтами, що мають суттєво різні характеристики, зокрема, їхня щільність значно нижча. Ці ґрунти характеризуються високим вмістом вуглецю, проте містять менше ключових біогенних елементів.

Після другої світової війни близько половини торфовищ були осушені та інтегровані в системи сівозмін для кормових та польових культур. Ці умови сприяють швидкому перетворенню ґрунту. Важливо зазначити, що без вжиття відповідних заходів, торф'яний шар може значно зменшитися в обсязі, повністю перетворившись на мінеральний ґрунт [5].

Десна служить природною межею між ліською та лісостеповою рослинністю. Ліськова зона характеризується наявністю змішаних дубово-соснових лісів, а також чорничних, орлякових та конвалієвих насаджень з

елементами сосново-дубових та чистих соснових лісів. В урбанізованих районах спостерігаються агрофітоценози типу *Quercus-Pinetea* та соново-дубових а також дубові ацидофільні ліси. Меншу частку займають хвойні ліси з переважанням сосни звичайної, які супроводжуються лишайниками, зеленомохами, чорницею та багновою рослинністю, що утворюють оліго-, мезо- та евтрофні болота. На території колишніх соснових лісів.

По берегах Десни та її річок-притоках розкидані луки, які відрізняються вологолюбними умовами та торф'яною рослинністю. Тут переважають види таких як костяниця лучна, кутник лучний, щучник дернистий, а також евтрофні болота, які формують лепешняк великий, осока гостра. Серед рослинності зустрічаються евтрофні луки, трав'яно-мохові, чагарникові та лісові болота.

В південних районах області переважають степові рослинні угруповання, головним чином лучні степи та остепнені луки, які формують домінантою види як костяниця валіська, тонконіг вузьколистий, осока низька, куцоніжка пірчаста та сеслерія Гойфлера. На цих територіях також трапляються агроценози. Лісисті рослинні угруповання представлені невеликими острівцями, зокрема дубовими (*Quercus robur*), грабово-дубовими (*Caprion-Quercetea*) та грабово-кленовими.

Цей район має лісистість, що складає 20,9 % від загальної площі лісів країни.

2.2. Методи збору польових даних

Для бакалаврської кваліфікаційної роботи всі дані були зібрані під час польових обстежень лісових ділянок на території Остерського лісництва Чернігівського надлісництва філії «Північний лісовий офіс». Збір проводився у польових умовах шляхом візуальної оцінки лісового покриву, фіксації координат ділянок зі змінами за допомогою GPS-навігаторів (табл. 2.1, табл. 2.2).

Таблиця 2.1

Ділянки вибіркового санітарного рубку (ВСР) за 2017 по 2023

Квартал	Виділ	Тип впливу	Рік впливу	Широта	Довгота
19	10	ВСР	2017	50,970999	30,909465
19	1	ВСР	2017	50,976064	30,914640
18	2	ВСР	2018	50,983136	30,899909
18	9	ВСР	2018	50,982167	30,907606
18	14	ВСР	2018	50,978553	30,907831
18	12	ВСР	2018	50,979123	30,907334
14	1	ВСР	2018	50,988447	30,955494
24	11	ВСР	2018	50,978495	30,975261
19	9	ВСР	2019	50,972146	30,908851
10	13	ВСР	2019	51,003884	30,945253
17	7	ВСР	2019	50,984571	30,973699
18	6	ВСР	2020	50,980126	30,899264
15	4	ВСР	2020	50,991152	30,960311
15	1	ВСР	2020	50,993586	30,963793
20	3	ВСР	2020	50,978821	30,935035
21	8	ВСР	2021	50,974570	30,940100
22	7	ВСР	2021	50,974262	30,950525
13	6	ВСР	2022	50,980817	30,936243
19	5	ВСР	2022	50,977838	30,919972
19	1	ВСР	2023	50,976064	30,914640

Вибіркові санітарні рубки в лісових насадженнях лісництва були пов'язані з масовим всиханням соснових деревостанів у результаті пошкоджень, викликаних верхівковим короїдом. Рубки проводилися середньої інтенсивності зі зменшенням запасу на 15–25 %.

Ділянки рубок головного користування (РГК) та суцільних санітарних рубок (ССР) за 2017 по 2023

Квартал	Виділ	Тип впливу	Рік впливу	Широта	Довгота
15	2	РГК	2017	50,990794	30,965524
15	12	РГК	2017	50,987153	30,966588
24	17.1	РГК	2017	50,974858	30,980424
24	2.1	РГК	2017	50,979258	30,974907
23	12	РГК	2019	50,973645	30,963082
22	2.1	РГК	2019	50,979618	30,958899
16	1	РГК	2019	50,985474	30,953846
20	11	РГК	2021	50,976897	30,926522
10	13	РГК	2021	51,003884	30,945253
24	6	РГК	2022	50,981389	30,976939
17	20	РГК	2022	50,982370	30,977109
17	18	РГК	2023	50,982064	30,975780
25	1.3	ССР	2017	51,011504	31,013641

Наведені дані використовувалися як вхідна інформація для здійснення географічної прив'язки під час аналізу змін лісового покриву за супутниковими знімками в середовищі QGIS. Координати забезпечують точну локалізацію об'єктів спостереження у геоінформаційних системах, що є необхідною умовою для проведення моніторингу динаміки лісового покриву та оцінки впливу антропогенних факторів.

Просторове розміщення ділянок з різними типами пошкоджень лісових насаджень зображено на рис. 2.3.

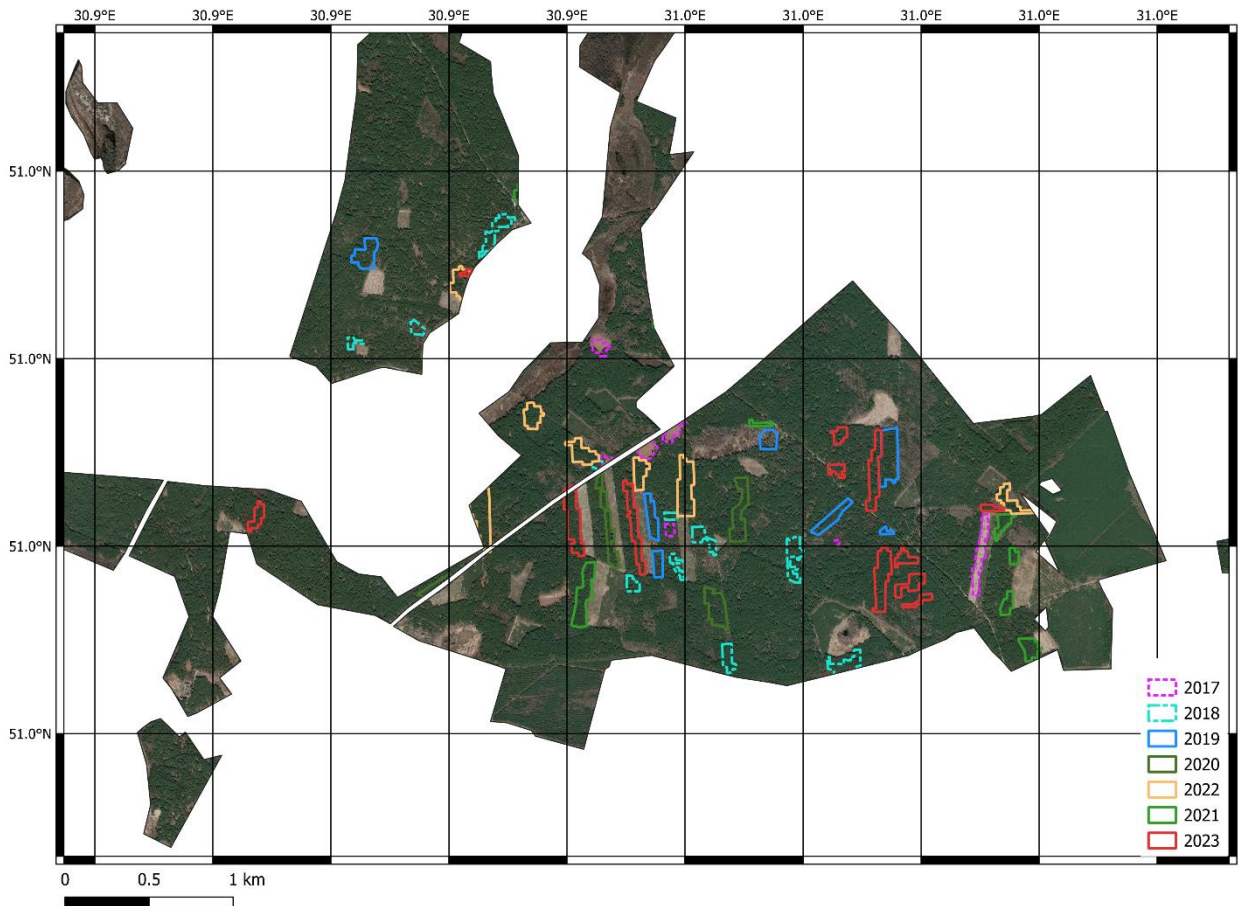


Рис. 2.3. Область інтересу в межах території дослідження з розташованими лісовими ділянками, де відбувалися зміни впродовж 2017–2023 рр.

2.3. Характеристика супутникових знімків

Для виконання роботи використано онлайн платформу SEPAL.io (System for Earth Observation Data Access, Processing and Analysis for Land Monitoring). Це сучасна хмарна платформа з відкритим програмним кодом, розроблена для ефективного доступу, обробки та аналізу супутникових даних з метою моніторингу земельного покриття [25].

Платформа SEPAL.io дозволила створити літні безхмарні мозаїки супутникових знімків Sentinel 2. Для цього для всіх років між 2017–2023 рр. відбирали всі супутникові знімки з хмарністю менше 5%. За спеціальними алгоритмами видаляли хмари, тіні від хмар і створювали мозаїку за допомогою

методу MEDOID [14]. Він є складнішою версією медіанного підходу, за яким для конкретного пікселя відбирається медіанне значення відповідних спектральних каналів. Для отримання з цього веб-сайту мозаїки потрібно зареєструватися на веб-сайті <https://sepal.io/>:

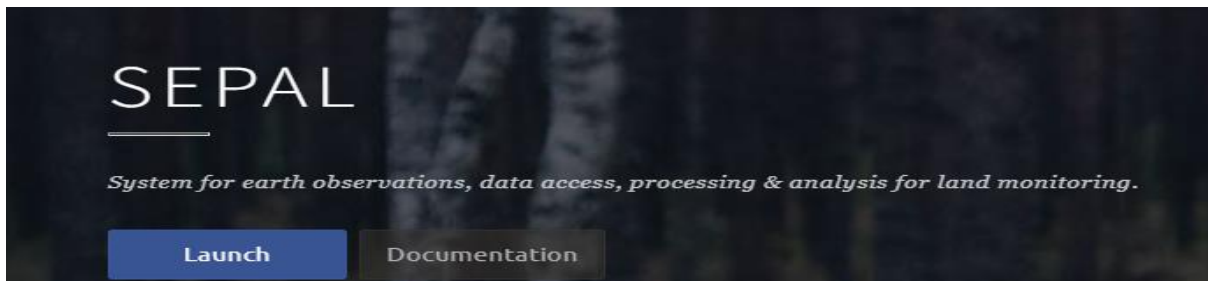


Рис. 2.4. Головна сторінка платформи SEPAL

Після запуску SEPAL потрібно пройти авторизацію – це відображено на рис. 2.5. Важливо також зазначити, що платформа працює в режимі перегляду даних. Для їхнього завантаження потрібна певні ресурси, які вимірюються годинами роботи процесорів і обсягом сховища. SEPAL надає такі ресурси за обґрунтованими запитом (навчальні цілі, дослідження).



Рис. 2.5. Вікно авторизації на платформі SEPAL

Після авторизації з'явиться можливість створювати мозаїку (рис. 2.6). На платформі SEPAL це представлено у вигляді «рецептів» – створення мозаїк, класифікація знімків тощо.

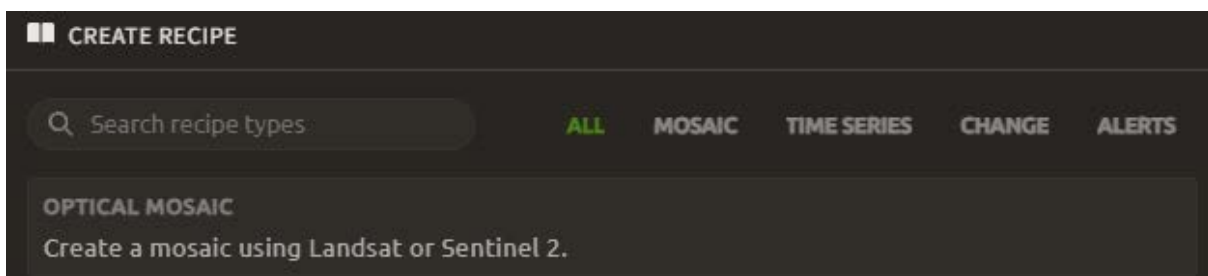


Рис. 2.6. Вікно для створення мозаїки на платформі SEPAL

Область інтересу задається офіційними границями країн, або користувацькими областями інтересу. Їх можна намалювати за допомогою відповідних інструментів, або завантажити готовий полігон. Після вибору області інтересу потрібно обрати рік, джерело супутникових даних, максимальний відсоток хмарності (не більше чим 5 %), як зображено на рис. 2.7.

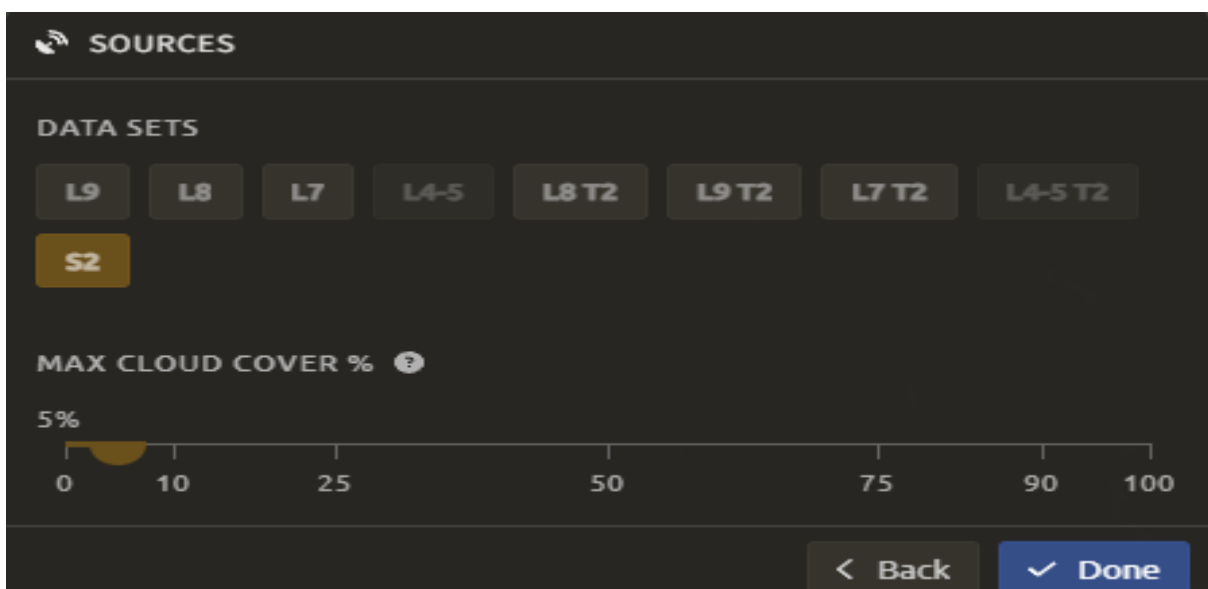


Рис. 2.7. Вибір джерел супутникових знімків та обмеження хмарності

Після цього виконується запит і на екрані відобразиться сформована безхмарна мозаїка, обрізана за зоною інтересу (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Безхмарна мозаїка супутникових знімків Sentinel 2, сформована за допомогою платформи SEPAL (комбінація каналів: B04-B03-B02)

Застосування платформи SEPAL дозволяє автоматизувати процеси підготовки супутникових матеріалів для аналізу динаміки змін у лісових масивах, ідентифікації порушень. Ця платформа є ефективним інструментом для моніторингу лісового покриву та має значний потенціал. Її перевагою в роботі була можливість автоматичного створення безхмарних мозаїк без необхідності завантаження великої кількості супутникових знімків.

Висновок до розділу 2.

1. Дистанційні методи моніторингу лісів повинні базуватися на наземних підходах. З цією метою в бакалаврській роботі виконано збір польових матеріалів, що характеризують лісові ділянки з різним ступенем пошкодження лісового покриву.

2. Сучасні хмарні платформи створюють передумови для успішного моніторингу лісів, забезпечуючи безкоштовний доступ до супутникових знімків і ефективну їхню обробку.

РОЗДІЛ 3. ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ДЗЗ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЗМІН ЛІСОВОГО ПОКРИВУ

3.1. Виявлення суцільних втрат лісового покриття за супутниковими знімками

Для того щоб виявити зміни лісового покриття за допомогою індексів (dNDVI, dNBR, RdNBR), потрібно застосувати порівняльний аналіз знімків, зроблених до і після змін, таких як рубка головного користування (РГК), вибіркова санітарна рубка (ВСР) або суцільна санітарна рубка (ССР).

Дата втрати визначається за польовими спостереженнями або архівними відомостями (лісорубні квитки). Для аналізу змін потрібно використовувати знімки в період вегетації, наприклад літні місяці. Перший знімок (до втрат) обирається до порушення. Другий знімок (після втрати) береться того самого числа, що і перший, але на один рік пізніше. Наприклад, якщо обрано супутниковий знімок Sentinel 2 за 20 червня 2017 року до втрат, то знімок після втрат потрібно одержати наступного року – 20 червня 2018 року. У нашому випадку використовувалися безхмарні мозаїки, цільові дати для яких визначалися за описаним принципом.

Оцінювання змін у лісах здійснювалася на основі аналізу багатоспектральних супутникових даних Sentinel-2. Для обробки використовували геоінформаційну систему QGIS. Інша хмарна платформа Google Earth Engine використовувалася для одержання безхмарних мозаїк, підготовлених на платформі SEPEL.io.

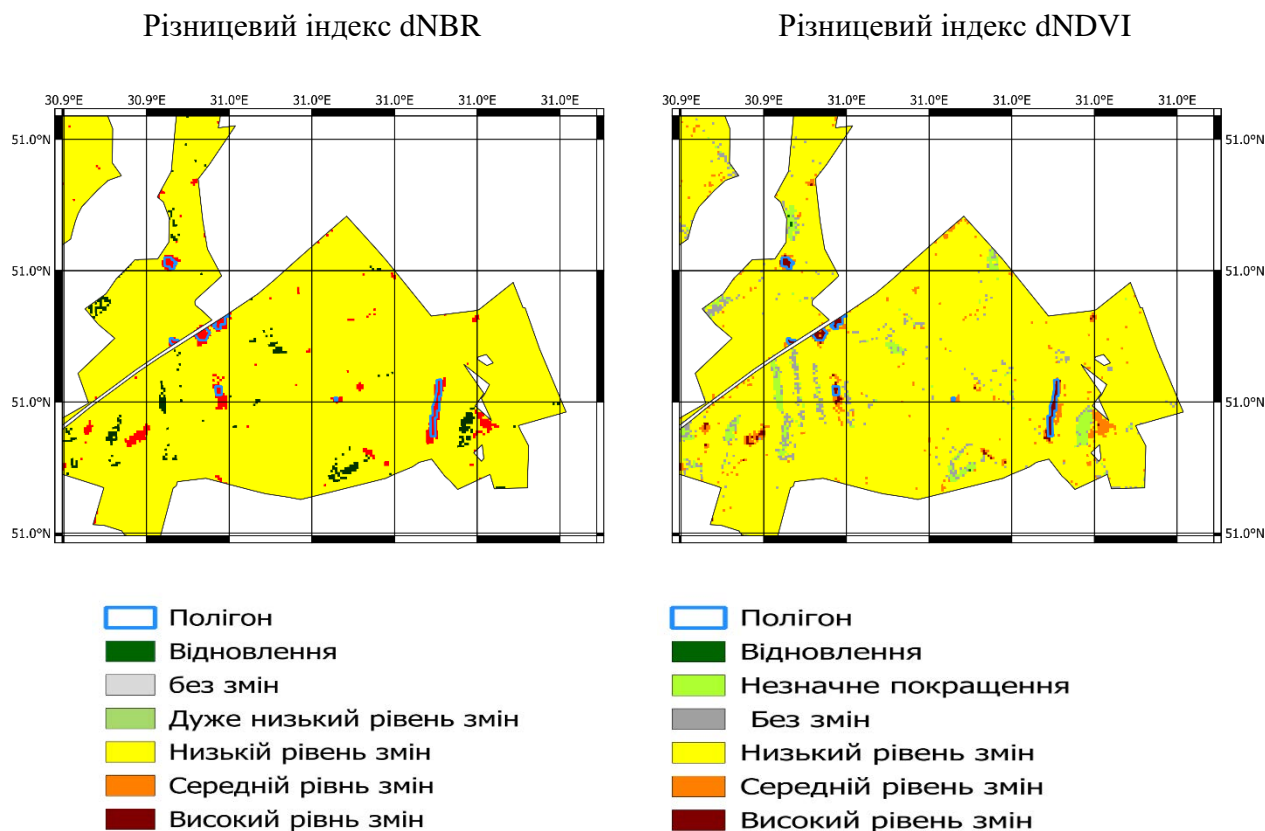


Рис. 3.1. Карта змін лісового покриття в 2017 році, одержана за допомогою індексів dNBR і dNDVI

Наведений рисунок дозволяє зробити висновок, що різницевий вегетаційний індекс, dNDVI надає більш деталізовану інформацію про загальний стан лісового покриття, включно з покращенням стану. Індекс dNBR краще виявляє зони з високим рівнем змін, особливо після рубок головного користування або суцільних санітарних.

Для розрахунку dNDVI використовується формула:

$$dNDVI = NDVI_{\text{до}} - NDVI_{\text{після}}, \quad (3.1)$$

Чутливість різницевого вегетаційного індексу dNDVI до змін у рослинному покриві демонструє також рис. 3.2. На ньому відображено пошкодження станом на 2018 рік. Різницевий індекс dNBR більш вдало спрацював для ідентифікації інтенсивних порушень, таких як рубки.

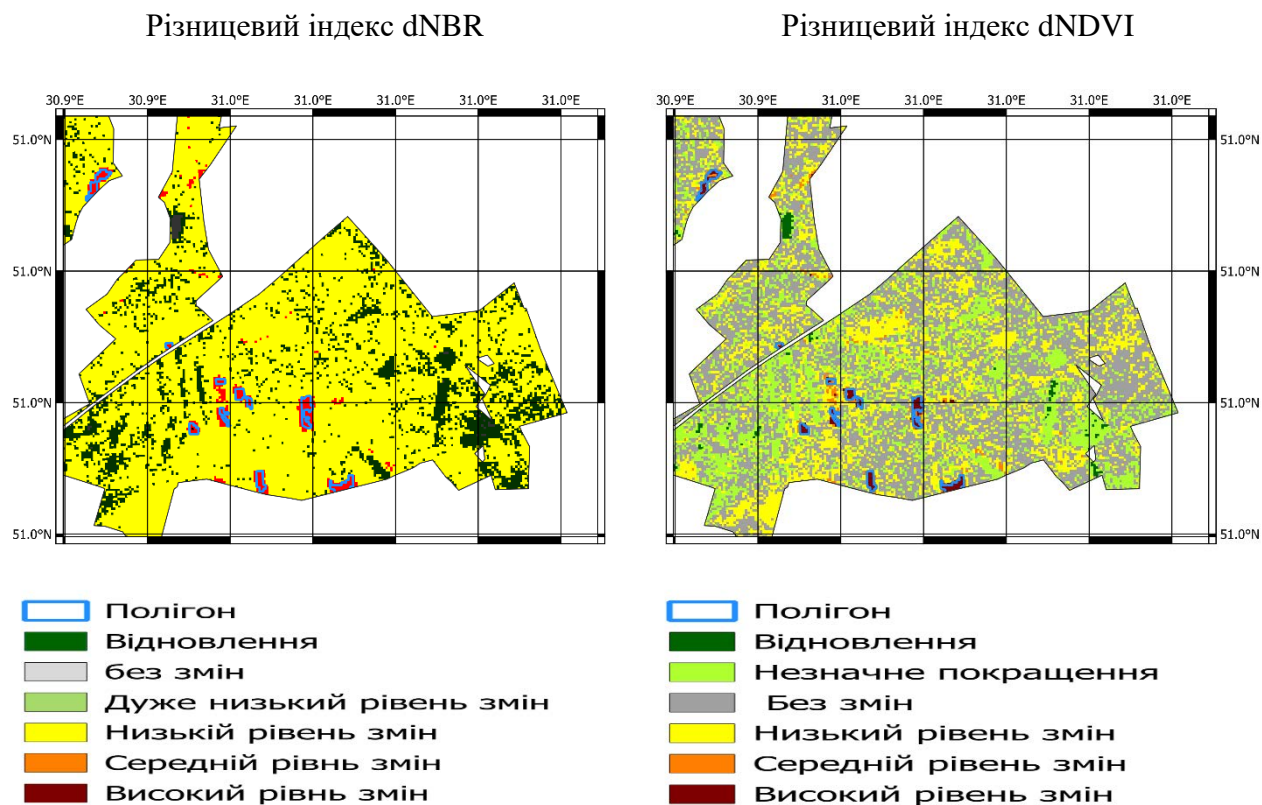


Рис. 3.2. Карта змін лісового покриття в 2018 році, одержана за допомогою індексів dNBR і dNDVI

Для розрахунку dNBR використовується формула:

$$dNBR = NBR_{\text{до}} - NBR_{\text{після}}, \quad (3.2)$$

Для порушень 2019 року також помічаємо подібну ситуацію (рис. 3.3). Різницевий вегетаційний індекс dNDVI демонструє вищу чутливість до змін у вегетації. Він виявляє більше змін порівняно з dNBR, включає незначні покращення, так і відновлення. На нашу думку, така поведінка необов'язково може бути пов'язана з реальними змінами лісового покриття. Певний вплив можуть мати відмінності в стані рослинності різних років у зв'язку відмінностями в погодних умовах (більше дощів, вищі температури тощо).

На відміну від цього індекс dNBR дозволяє ідентифікувати високий ступінь пошкоджень більш чітко. Зокрема, на рисунку помічаємо, що пошкодження з високим рівнем змін мають лінійні контури. Це підтверджує можливість використання індексу для моніторингу суцільних рубок

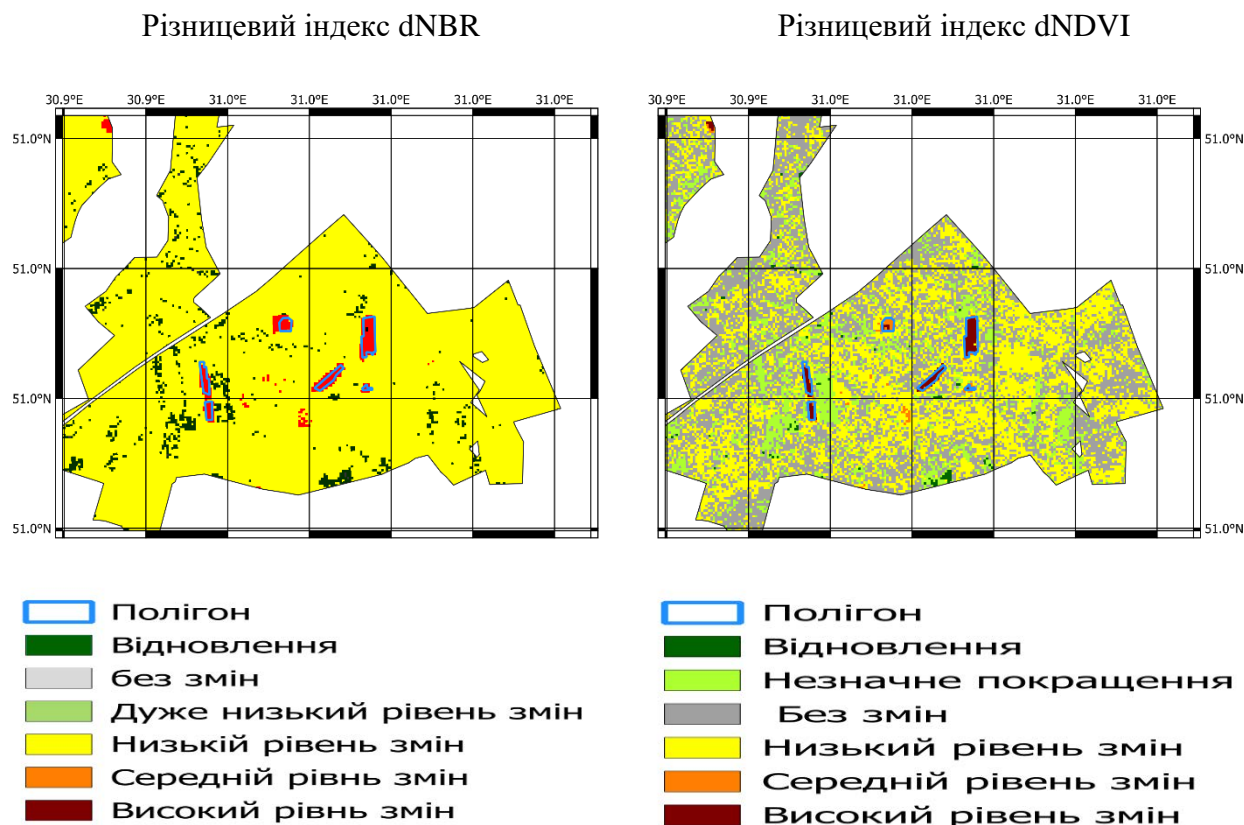


Рис. 3.3. Карта змін лісового покриття в 2019 році, одержана за допомогою індексів dNBR і dNDVI

На рис. 3.4, який відображає стан пошкоджень лісових насаджень 2020 року, зроблені висновки також підтверджуються. Так, для індексу dNBR залишається характерною висока чутливість до виявлення суцільних рубок. Прикладом може бути висока узгодженість між нанесеними на карту (червоний колір) ділянками з втратами лісів та реальними периметрами суцільних рубок. Іншою особливістю, яка підтверджує цей факт, є довга смуга в правій частині області інтересу, що була чітко нанесена на карту за допомогою різницевого індекса dNBR. Такий тип пошкоджень пов'язаний із прокладанням покращеної дороги для пересування лісовозів.

Різницевий вегетаційний індекс dNDVI виявляє ширший спектр змін, однак суцільні втрати проявляються нечітко.

Різницевий індекс dNBR

Різницевий індекс dNDVI

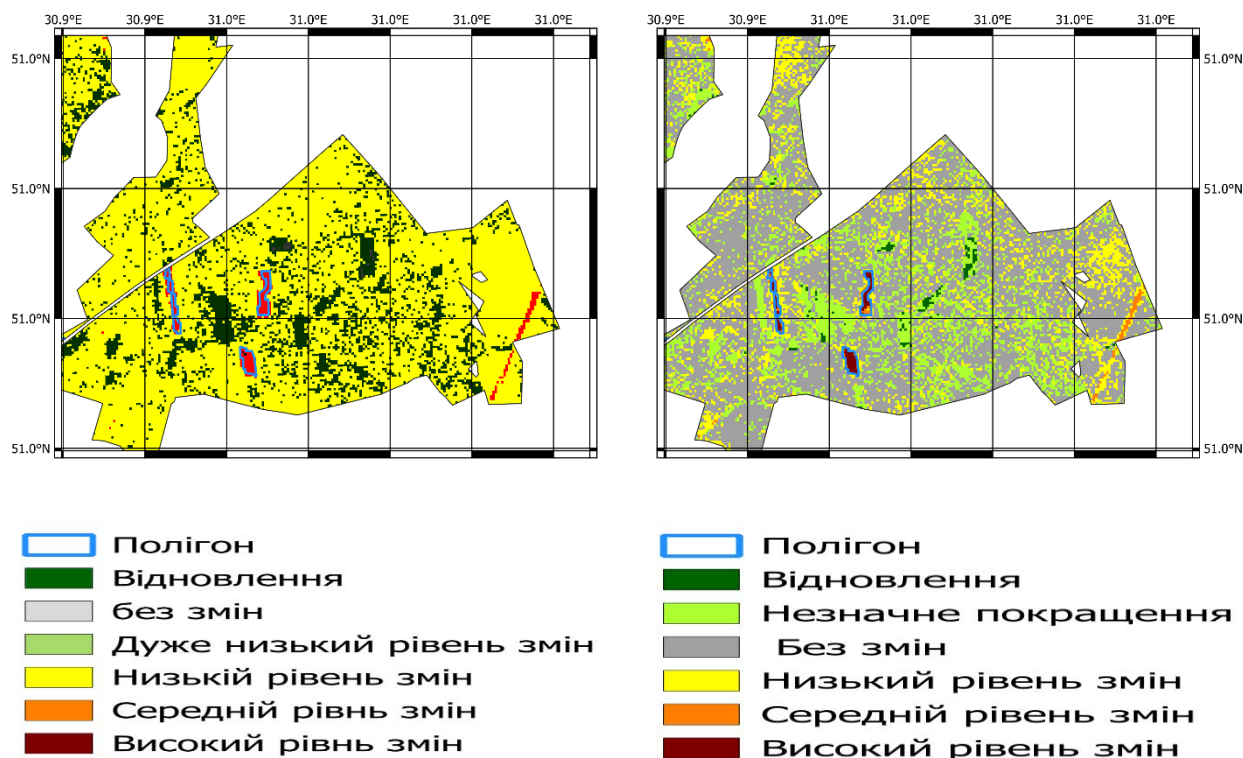
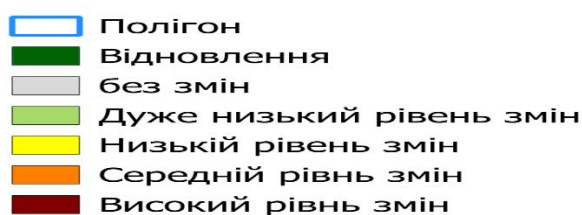
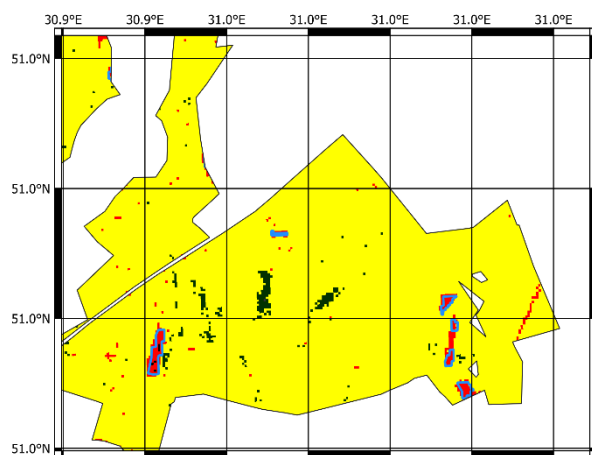


Рис. 3.4. Карта змін лісового покриття в 2020 році, одержана за допомогою індексів dNBR і dNDVI

Подібну чутливість індексів dNBR і dNDVI до втрат лісового покриття ілюструються також рис. 3.5–3.6. Загалом помічаємо, що dNBR дозволяє чітко відстежувати суцільні рубки. При цьому зберігається високий рівень диференціації між пошкодженими та непошкодженими лісовими ділянками. Така особливість робить цей індекс досить ефективним для моніторингу втрат лісового покриття, тобто, коли відбувається трансформація вкритих лісовою рослинністю ділянок у невриті.

Індекс dNDVI зберігає високу чутливість до різноманітних пошкоджень, у зв'язку з чим диференціація зрубів не настільки чітка, як у випадку з індексом dNBR. Загалом, треба враховувати, що закартовані пошкодження низької інтенсивності можуть бути викликані варіацією спектрального відбиття між знімками різних років, а не реальними змінами.

Різницевий індекс dNBR



Різницевий індекс dNDVI

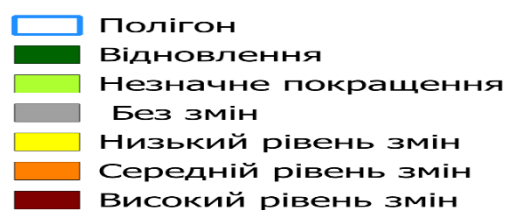
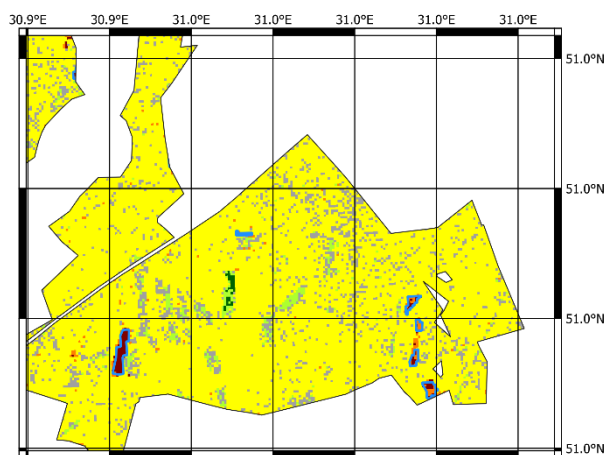
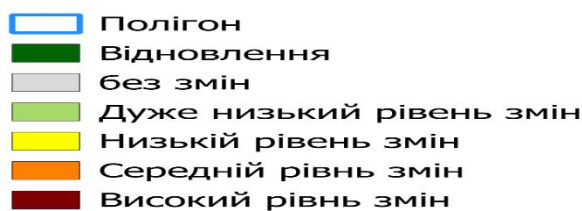
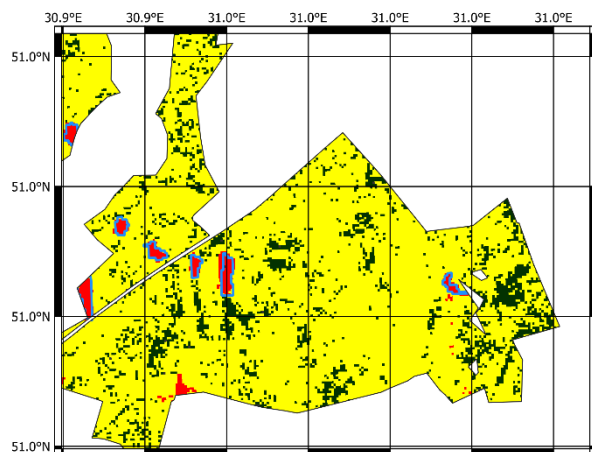


Рис. 3.5. Карта змін лісового покриття в 2021 році, одержана за допомогою індексів dNBR і dNDVI

Різницевий індекс dNBR



Різницевий індекс dNDVI

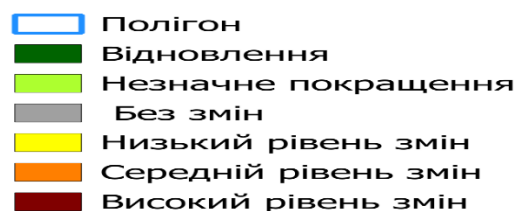
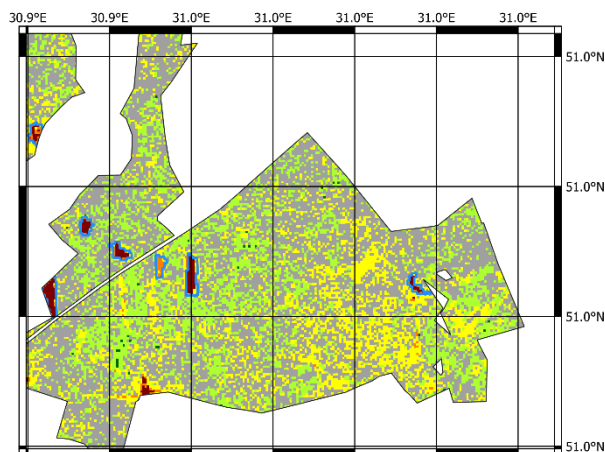


Рис. 3.6. Карта змін лісового покриття в 2022 році, одержана за допомогою індексів dNBR і dNDVI

Різницевий індекс dNBR

Різницевий індекс dNDVI

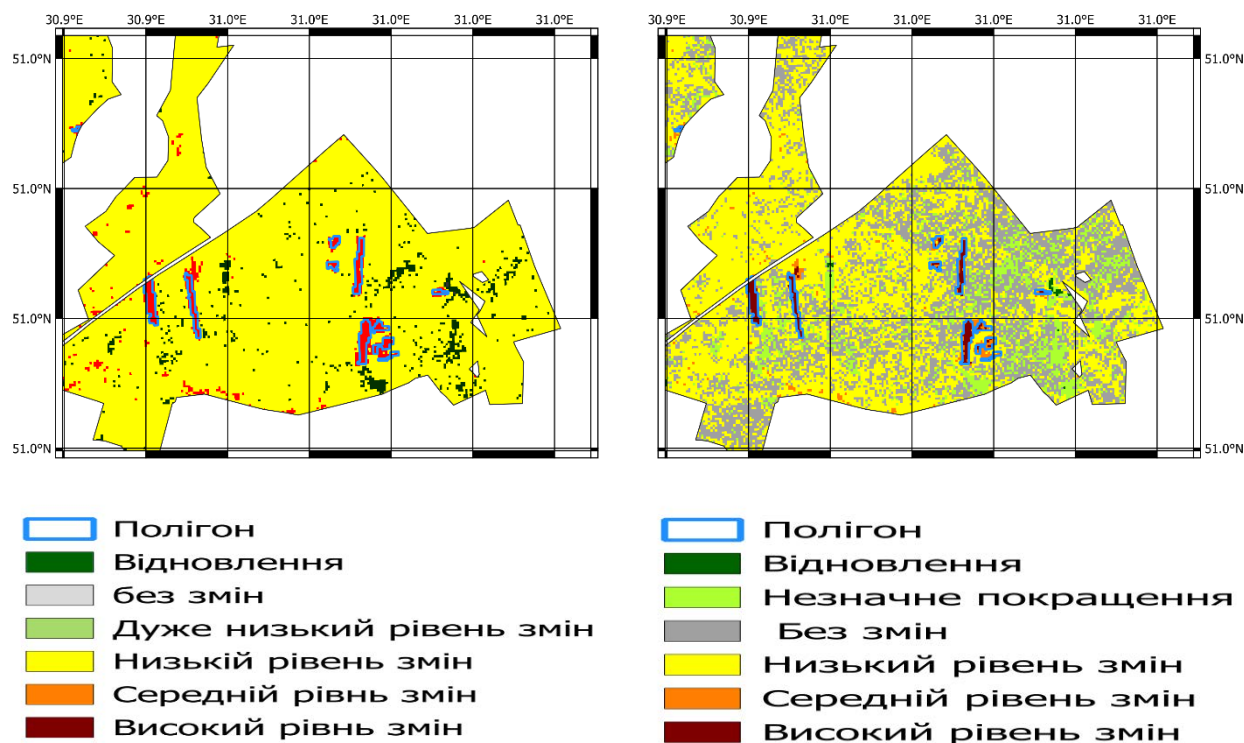


Рис. 3.7. Карта змін лісового покриття в 2023 році, одержана за допомогою індексів dNBR і dNDVI

Виконане картографування дозволило узагальнити значення різницевого індексу dNBR для різних типів пошкоджень (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Динаміка змін лісового покриття за dNBR

Рік змін	Вид змін		
	ВСП	РГК	ССР
2017	0,45	0,54	0,50
2018	0,44	0,45	
2019	0,43	0,51	
2020	0,36	0,47	
2021	0,38	0,44	
2022	0,42	0,40	
2023	0,41	0,46	

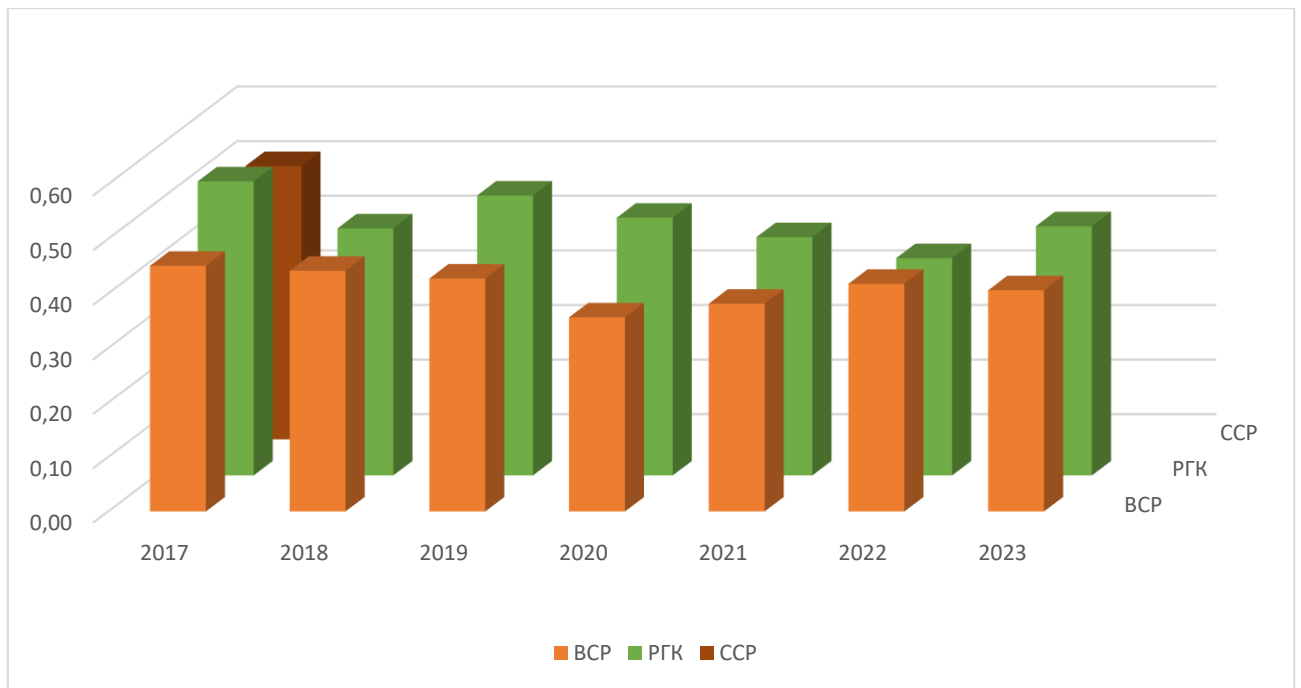


Рис. 3.8. Динаміка змін лісового покриття за індексом dNBR

3.2. Особливості виявлення часткових втрат лісового покриття

Часткові втрати лісів передбачають зниження щільності деревного покриття без повного зникнення лісової рослинності на певній території. Такі зміни можуть бути спричинені вибілковими рубками, пошкодженням деревостанів шкідниками, буревіями або іншими впливами, які не призводять до суцільного вирубаня. Виявлення подібних змін значно складніше, ніж фіксація повного знищення лісу, оскільки порушення не завжди суттєво змінюють спектральні характеристики покриття на супутникових знімках.

Особливості ідентифікації часткових витрат є низький рівень спектральної контрастності між ураженими та неураженими ділянками, що ускладнює їх виділення при використанні традиційних індексів вегетації, зокрема NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) чи NBR (Normalized Burn Ratio). У зв'язку з цим актуальним є використання різницевих та відносних індексів (dNDVI, dNBR, RdNBR), які враховують зміни інтенсивності спектральних характеристик у часі та підвищують чутливість до навіть незначних змін у

структурі лісового покриву. Значну роль у виявленні часткових втрат відіграє використання супутникових знімків з високою просторовою роздільною здатністю (Sentinel-2, PlanetScope), які дозволяють фіксувати локальні зміни в межах окремих пікселів.

Використання хмарних платформ для обробки супутникових даних, наприклад Google Earth Engine, відкриває можливості для автоматизованого аналізу змін ґрунтового покриття за допомогою архівних даних, що містяться в глобальних супутникових реєстрах. Комбінування багатоспектрального аналізу, аналізу часових рядів та просторової фільтрації є потужним інструментом для відстеження змін у лісових масивах, особливо у випадках їх поступової деградації або вибіркового впливу.

Формула для розрахунку RdNBR:

$$\text{RdNBR} = \left(\frac{\text{NBR}_{\text{до}} - \text{NBR}_{\text{після}}}{\text{SquareRoot}(\text{ABS}(\frac{\text{NBR}_{\text{до}}}{1000}))} \right), \quad (3.3)$$

де:

SquareRoot – квадратний корінь;

ABS – абсолютне значення велечини;

1000 – коефіцієнт переведення цілих значень супутникового продукту у відносні;

Отже, виявлення часткових змін лісового покриву потребує поєднання різних методів, які будуть узгоджені з особливостями кожного регіону та його екологічних умов. Такий підхід забезпечує більш точне відстеження стану лісів та своєчасну реакцію на ознаки їхнього погіршення, що є основоположним для сталого лісокористування та збереження екологічної безпеки.

Наведені карти з порушеними ділянками (рис. 3.10–3.16) дозволяє зробити висновок, що різницевий вегетаційний індекс RdNBR надає більш збалансовану оцінку змін, порівняно з dNBR. Завдяки врахуванню початкового стану рослинності, індекс RdNBR менш чутливий до незначних порушень або ділянок з низькою біомасою, що дозволяє оцінювати фактичні зміни об'єктивніше у лісовому покриві.

У 2017 році (рис. 3.10) зафіксовано значні зміни, які за індексом RdNBR класифікувалися переважно як зміни низького та середнього рівня. У 2018 році (рис. 3.11) площа змін дещо зменшилася. Індекс RdNBR показував переважання низького рівня змін, що може свідчити про зниження впливу або початок природного відновлення рослинного покриву.

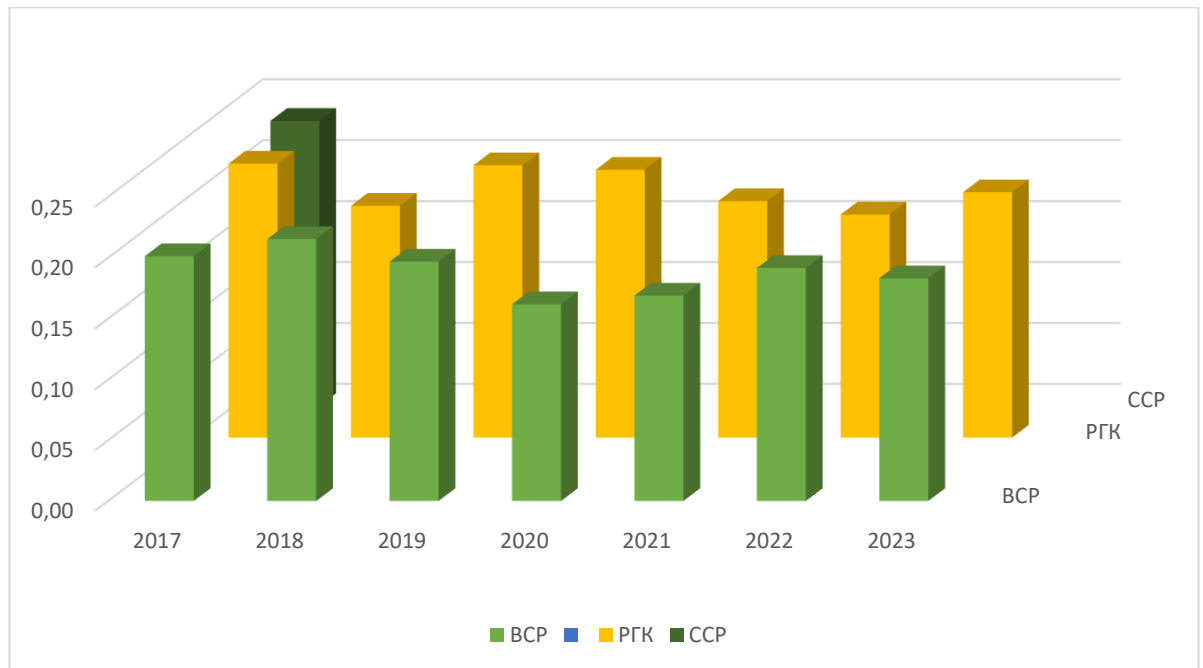


Рис.3 .9. Динаміка часткових змін лісового покриву за індексом RdNBR

Таблиця 3.2

Динаміка змін лісового покриву за RdNBR

Рік змін	Вид змін		
	BCP	PTK	CCP
2017	0,20	0,23	0,23
2018	0,22	0,19	
2019	0,20	0,22	
2020	0,16	0,22	
2021	0,17	0,19	
2022	0,19	0,18	
2023	0,18	0,20	

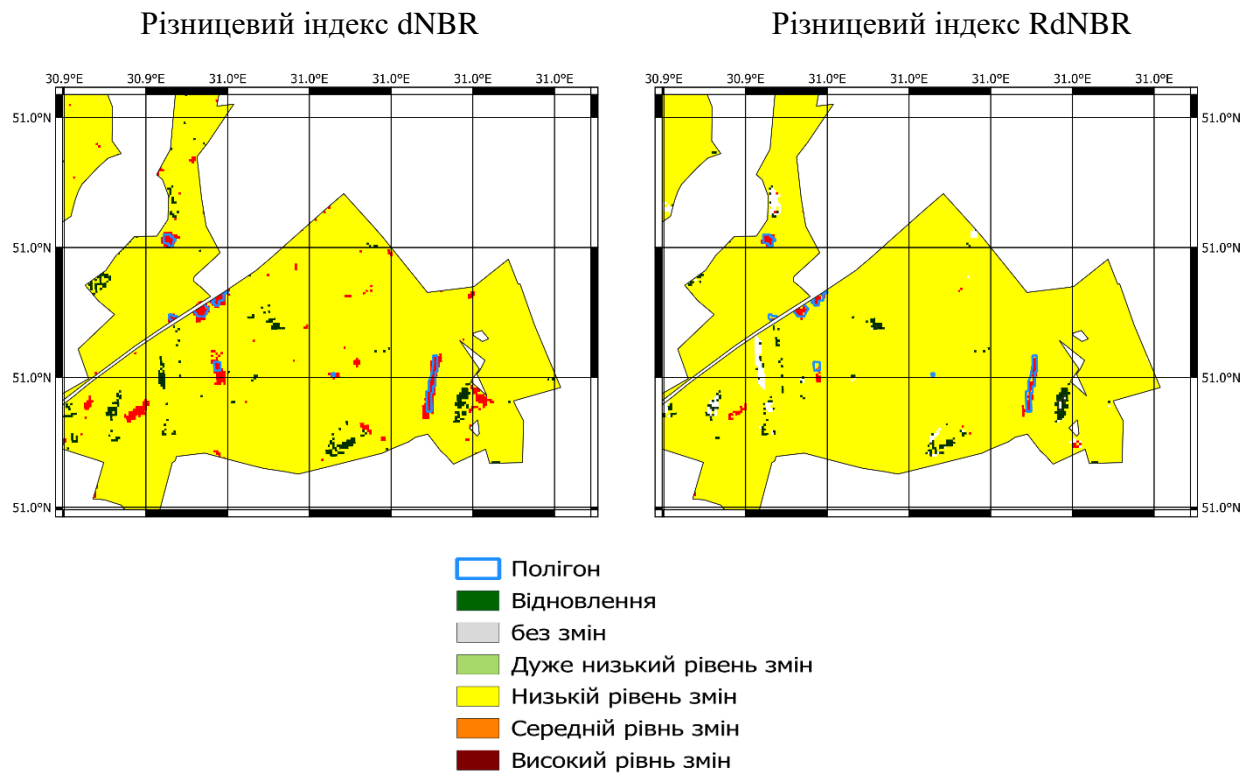


Рис. 3.10. Карта часткових змін лісового покриття в 2017 році, побудована за допомогою індексів dNBR і RdNBR

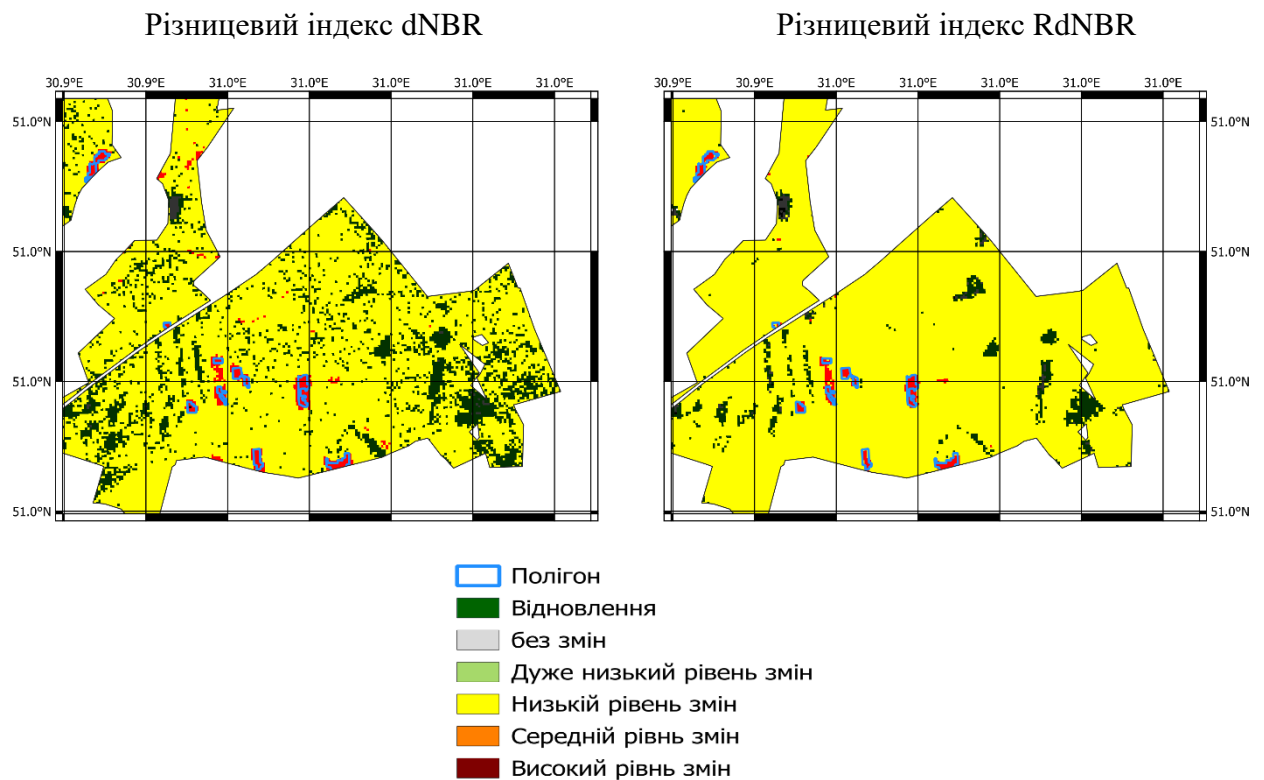


Рис. 3.11. Карта часткових змін лісового покриття в 2018 році, побудована за допомогою індексів dNBR і RdNBR

Наведені рисунки змін для решти років (рис. 3.12–3.16) дозволяють зробити висновок, що індекс dNBR продовжує виявляти більшу кількість змін у лісовому покриві. Індекс RdNBR є більш чутливим до змін, які відбуваються в лісових насадженнях з різною повнотою та складом. При моніторингу пошкоджень лісових насаджень потрібно враховувати яким був початковий склад деревостанів, зокрема це стосується співвідношення хвойних і листяних порід. Суттєвий вплив матиме вік деревостану, наявність підліску, тип підстильної поверхні. Для індексу dNBR ці фактори врахувати складніше і в більшості випадків потрібно адаптувати специфічні порогові значення для класифікації порушень для різних лісових насаджень. У цьому відношенні індекс RdNBR має переваги, бо є відносним індексом, таким чином він краще відповідає завданням моніторингу часткових змін лісових насаджень.

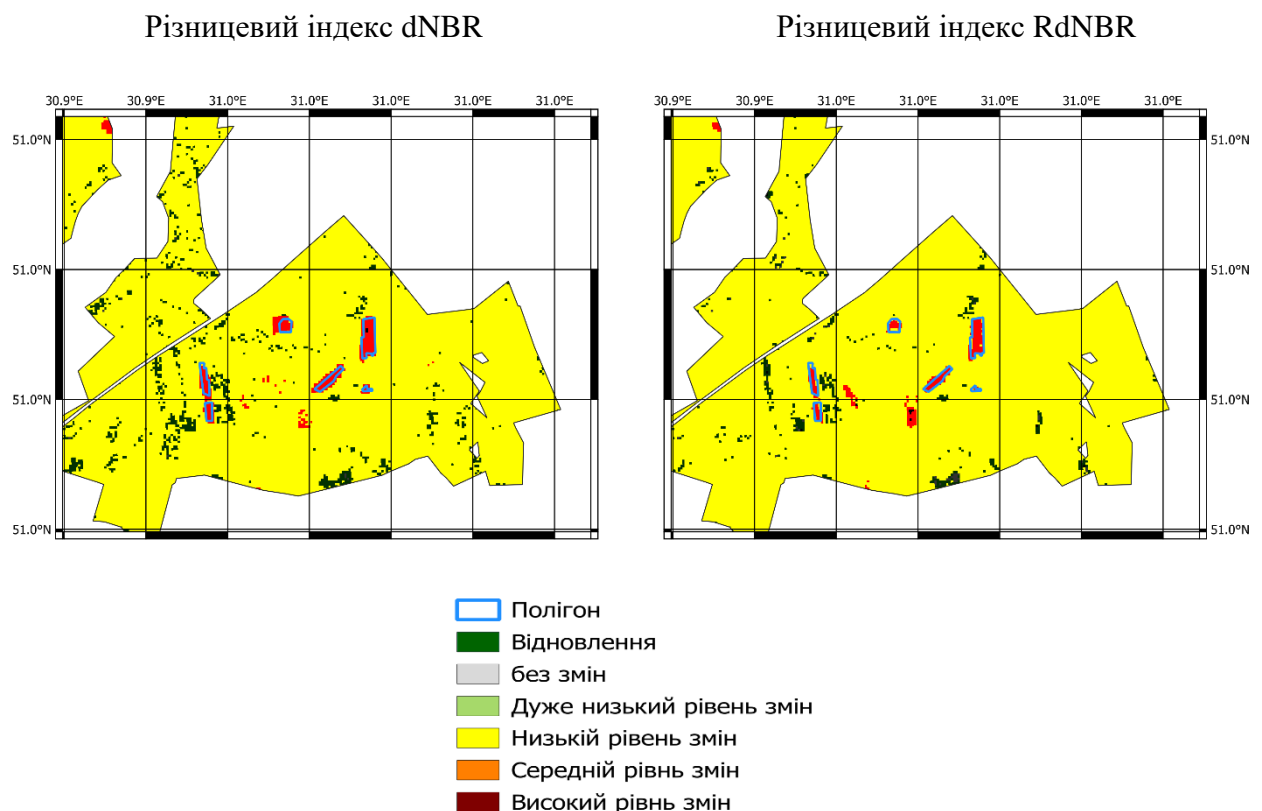


Рис. 3.12. Карта часткових змін лісового покриву в 2019 році за допомогою індексів dNBR і RdNBR

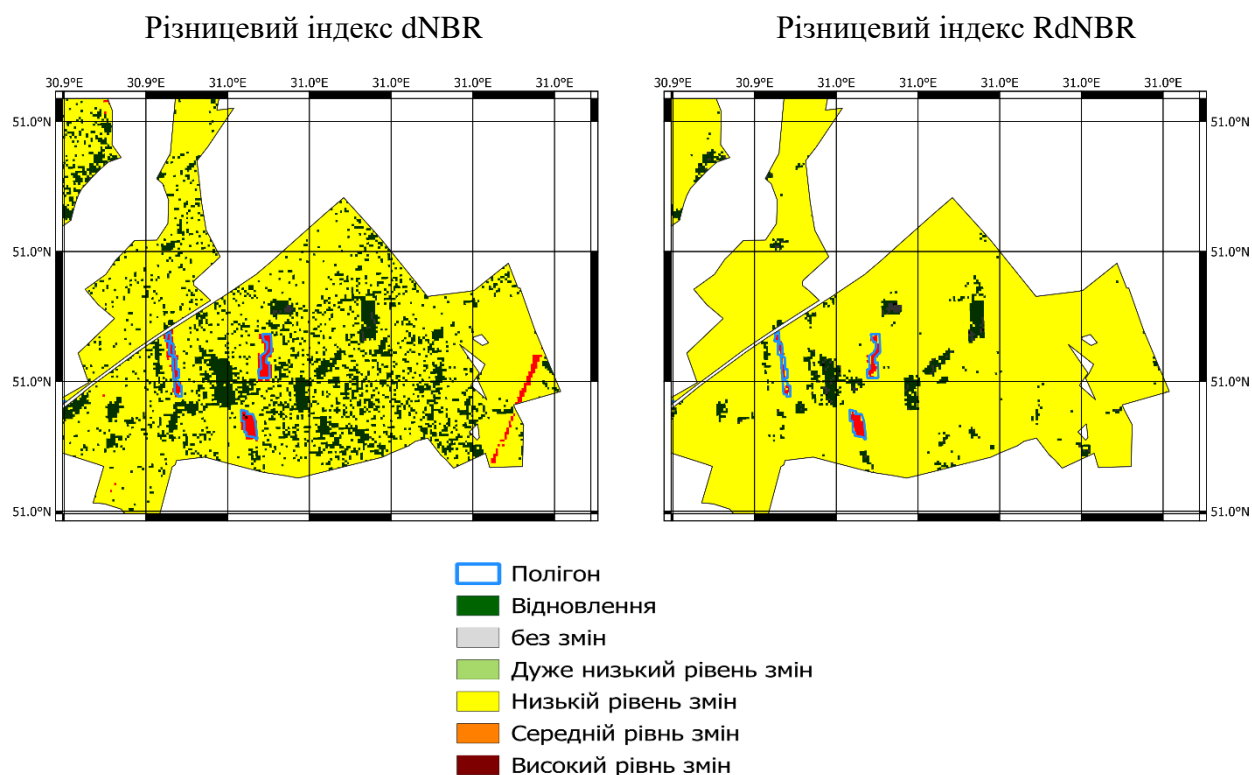


Рис. 3.13. Карта часткових змін лісового покриття в 2020 році, одержана за допомогою індексів dNBR і RdNBR

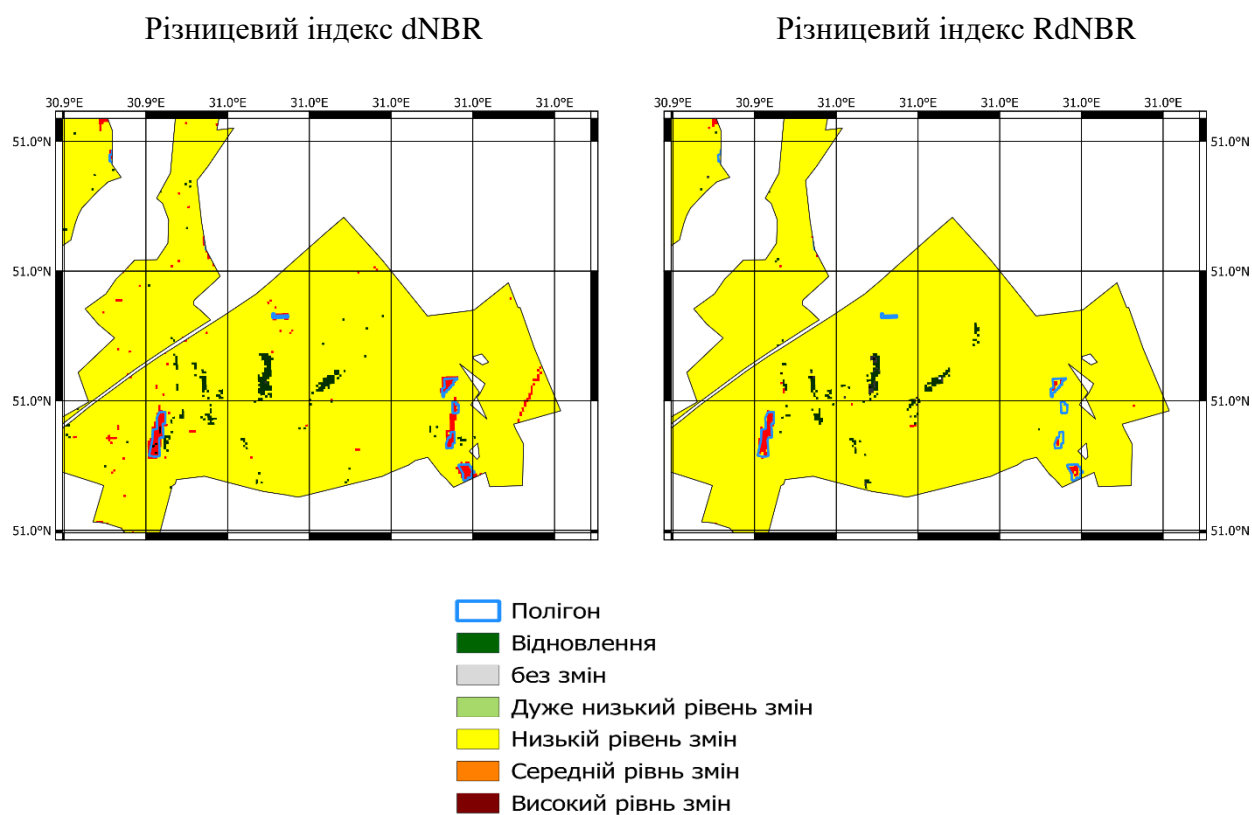


Рис. 3.14. Карта часткових змін лісового покриття в 2021 році за допомогою індексів dNBR і RdNBR

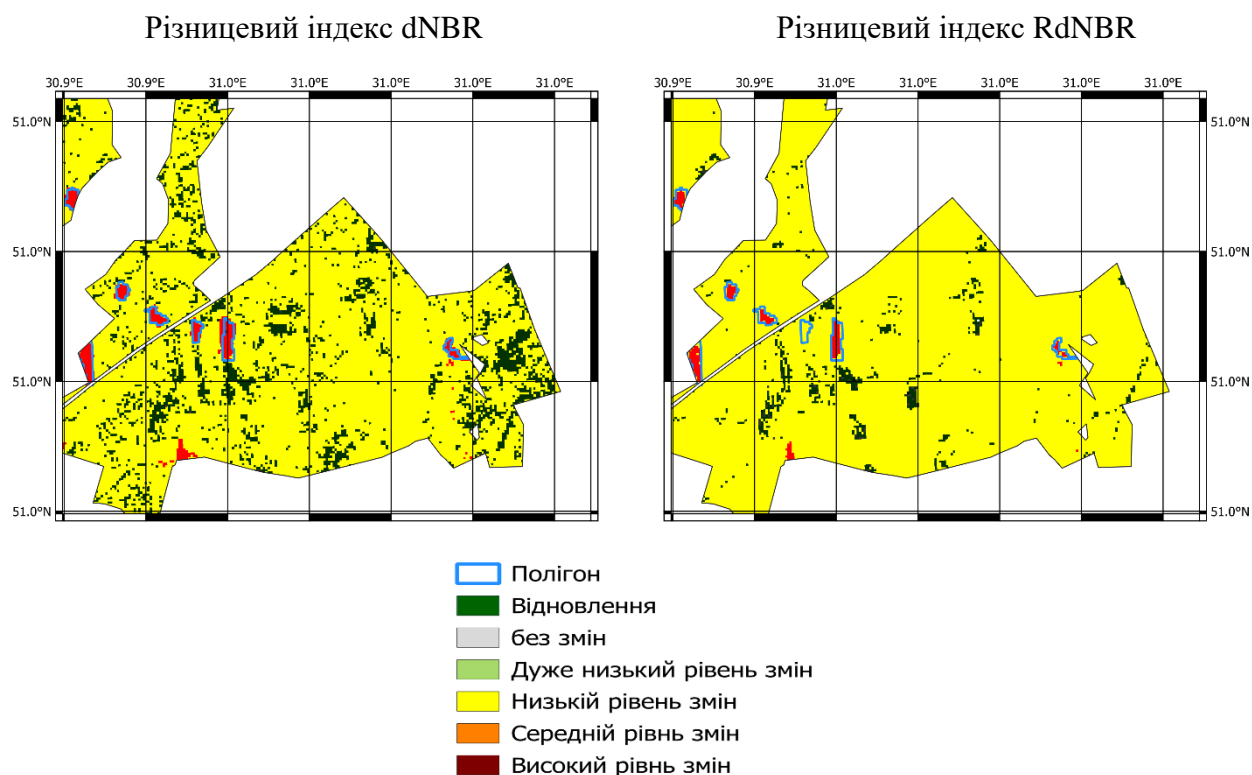


Рис. 3.15. Карта часткових змін лісового покриття в 2022 році за допомогою індексів dNBR і RdNBR

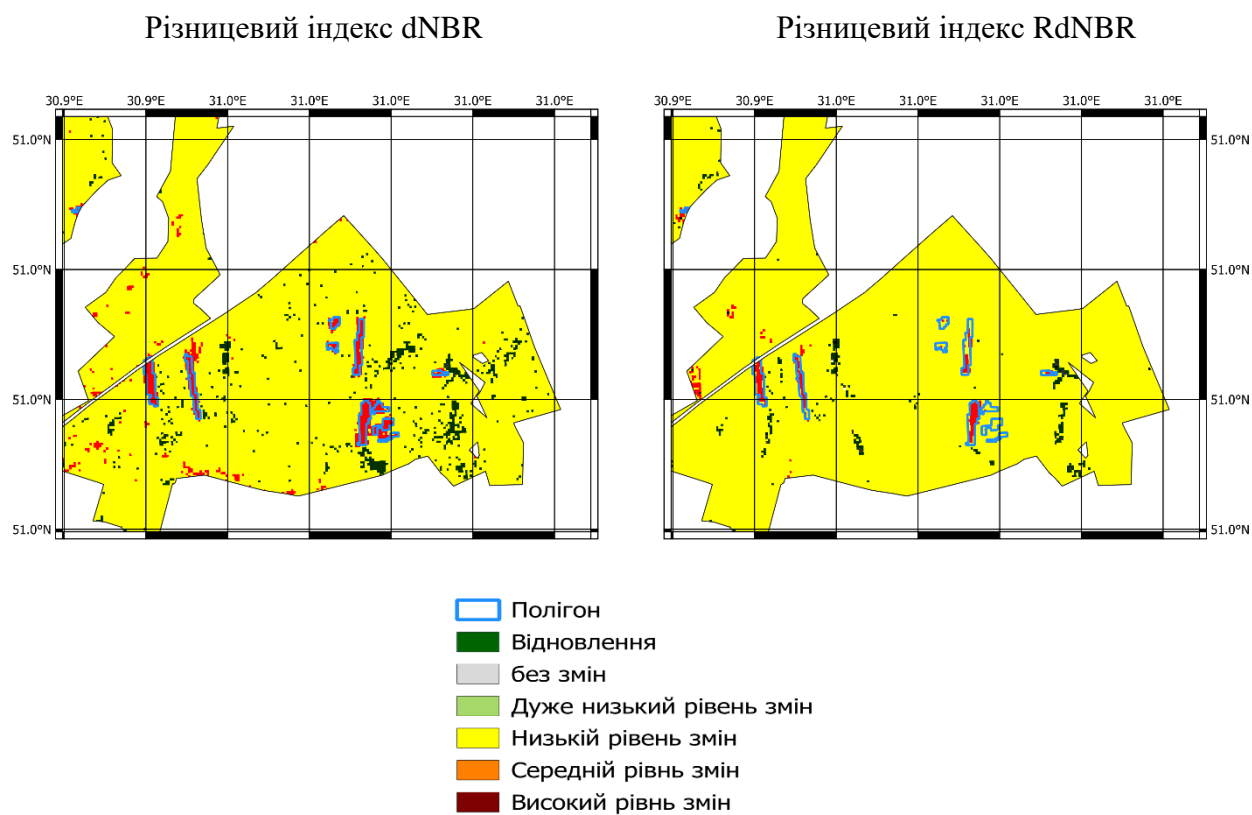


Рис. 3.16. Карта часткових змін лісового покриття в 2023 році за допомогою індексів dNBR і RdNBR

3.3. Перспективи моніторингу динаміки лісів за допомогою даних дистанційного зондування Землі

У сучасних умовах глобальних екологічних змін моніторинг лісових екосистем набуває особливого значення. Ліси відіграють ключову роль у підтриманні кліматичної рівноваги, збереженні біорізноманіття та забезпеченні екологічної безпеки. Тому оцінка змін у площах лісових насаджень вимагає точного, системного підходу.

Одним з найефективніших сучасних інструментів для вивчення просторово-часової динаміки лісів поєднання в геоінформаційних системах (ГІС) наземних спостережень із супутниковими даними [17, 15]. Ці технології дозволяють здійснювати безперервний дистанційний контроль за станом лісових масивів на регіональному, національному та глобальному рівнях. GPS система забезпечує визначення координат ділянок з високою точністю, досягаючи кількох метрів, що є ключовим фактором для моніторингу змін в лісах. Якщо використовувати якісні знімки то можна аналізувати ефективність лісовідновних програм такі як зелена країна.

ГІС-технології у сферу екологічного контролю лісів відкриває шлях до більш глибокого розуміння як людського, так і природного впливу на ці екосистеми. Ця технологія забезпечує надійні дані, необхідні для прийняття ефективних рішень щодо захисту, відновлення та раціонального використання лісових ресурсів, що в кінцевому підсумку сприяє досягненню глобальних цілей щодо стабілізації клімату та відновлення екосистем.

Ліси Чернігівщини руйнуються через постійні російські обстріли, збиття БПЛА значна площа лісів знищена або частково пошкоджена, так як рятувальники та лісівники не можуть оперативно реагувати та добиратися до цих місць.

Порушення, що виникають внаслідок природних явищ, є природного походження. Загоряння лісу виникає за умов високих температур та низької

вологості. Великі лісові масиви загрожують шкідники, такі як короїди та лубоїди, а також грибкові захворювання, наприклад, коренева гниль. Лісові масиви можуть бути пошкоджені різними стихійними явищами, такими як вітроломи та буреломи, що виникають внаслідок сильних поривів вітру, ураганів або смерчів. Затоплення та повені призводять до руйнування кореневої системи рослин через надмірне зволоження. Зсуви та обвалення ґрунту становлять загрозу для стану лісів, завдаючи шкоди їхньому зростанню. Сухість, що виражається в зниженні вологості, може призвести до загибелі деревних культур та пошкодження лісових масивів.

Для оперативного реагування на пожежі можна використовувати безпілотні летальні апарати (БПЛА) і не тільки для лісових пожеж також можна слідкувати за незаконними рубками.

У лісовому секторі глобальна практика демонструє зростаюче зацікавлення застосуванням безпілотників для аеропатрулювання лісових масивів у періоди підвищеної пожежної небезпеки. Такий підхід є економічно доцільнішим, оскільки вартість використання БПЛА в середньому у п'ять разів нижча порівняно з експлуатацією традиційних повітряних засобів, зокрема гелікоптерів та легкомоторних літаків [6]. На жаль, в умовах військового стану такі підходи не можуть застосовуватися.

Доцільною є організація системного використання БПЛА на регіональному рівні, зокрема через координацію їх діяльності обласними управліннями лісового господарства або міжгосподарськими об'єднаннями, що охоплюють території зі спільними кордонами. Особлива увага має приділятися районам із встановленим високим класом пожежної небезпеки, де використання БПЛА може відігравати ключову роль у превентивному моніторингу та оперативному реагуванні на виникнення лісових пожеж [6].

Висновок до розділу 3. Результати аналізу прикладних аспектів використання даних дистанційного зондування Землі підтвердили високу

інформативність індексів dNDVI, dNBR та RdNBR у контексті виявлення змін у лісовому покриві. Порівняння супутникових знімків Sentinel 2 за період 2017–2023 років дозволило детально відобразити динаміку змін у лісових насадженнях області інтересу. На основі виконаного дослідження можна сформулювати такі висновки:

1. Індекс dNBR є ефективним у виявленні значних порушень рослинного покриву, зокрема суцільних рубок і наслідків пожеж.

2. Індекс dNDVI виявився більш чутливим до помірних і дрібномасштабних змін, а також до ознак відновлення вегетації, що робить його доцільним для моніторингу часткових порушень лісового покриву.

3. Застосування RdNBR, що передбачає нормалізацію відносно вихідного стану ділянки, дало змогу зменшити вплив природних коливань біомаси та покращити об'єктивність оцінки пошкоджень.

Отже, поєднання спектральних перетворень даних супутників з геоінформаційними інструментами дозволяє визначати зміни в лісовому покриві.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі здійснено комплексне дослідження змін лісового покриву на прикладі ділянок Остерського лісництва Чернігівського надлісництва філії «Північний лісовий офіс» ДП «Ліси України» з використанням даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

На основі виконаної роботи можна сформулювати такі висновки.

1. Технології ДЗЗ є ефективним інструментом для моніторингу змін лісового покриву як у глобальному, так і в регіональному масштабі.

2. Сучасні хмарні платформи створюють передумови для успішного моніторингу лісів, забезпечуючи безкоштовний доступ до супутникових знімків і ефективну їхню обробку.

3. Дистанційні методи моніторингу лісів повинні базуватися на наземних підходах.

4. Моніторинг змін за допомогою супутникових даних Sentinel 2, використовуючи різницеві вегетаційні індекси (dNDVI, dNBR, RdNBR), створює передумови для запровадження систематичного моніторингу змін стану лісових насаджень.

5. Для швидкої оцінки можуть застосовуватися глобальні карти змін, які забезпечують узагальнену інформацію щодо просторово-часової динаміки лісів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аерокосмічні методи : курс лекцій. Умань : Уманський нац. ун-т садівництва, 65 с. URL: <https://ecology.udau.edu.ua/assets/files/024.pdf> (дата звернення 20.05.2025).
2. Європейська система інформації про лісові пожежі (EFFIS). Burnt Area Product. Опис методології : веб-сайт. URL: <https://effis.jrc.ec.europa.eu/applications/burnt-area-map/> (дата звернення 25.05.2025).
3. Лакида П. І., Миронюк В. В., Гілітуха Д. В. Аналіз та інтерпретація карти високого просторового розрізнення лісових екосистем Полісся України. Науково-практичний журнал. 2014. № 4. С. 5–9.
4. Лесів М. Ю., Щепашенко Д. Г., Швіденко А. З, Бунь Р. А. Побудова карти лісів України за даними глобальних цифрових карт земельного покриття. Наук. Вісн. НЛТУ України. 2012. 22.9. С. 24– 30.
5. Національний атлас України : веб-сайт. URL: <http://wdc.org.ua/atlas/default.html> (дата звернення 20.05.2025).
6. Яворовський П., Зібцев С. Небесний патруль : веб-сайт. URL: <https://ekoinform.com.ua/?p=6728> (дата звернення 25.05.2025).
7. Яценко Д. Оптичні сенсори: веб-сайт. URL: <https://www.smartfarming.ua/yak-optychni-sensory-dozvolyayut-ekonomyty-zzr-ta-dobryva/> (дата звернення 30.05.2025).
8. Aqua satellite. NASA. URL: <https://aqua.nasa.gov> (дата звернення 27.05.2025).
9. CORINE Land Cover. Copernicus Land Monitoring Service : веб-сайт. URL: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> (дата звернення 25.05.2025).
10. EOSDA Forest Monitoring: Forest Management Software : веб-сайт. URL: <https://eos.com/products/forest-monitoring/>.

11. European Space Agency (ESA). Sentinel-2 Overview : веб-сайт. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sentinel-2> (дата звернення 26.04.2025).
12. European Space Agency. Biomass poised for liftoff to unveil forest secrets : веб-сайт. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Biomass (дата звернення 21.05.2025).
13. European Space Agency. Copernicus Sentinel missions : веб-сайт. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions> (дата звернення 25.05.2025).
14. Flood, N. Seasonal Composite Landsat TM/ETM plus Images Using the Medoid (a Multi-Dimensional Median). Remote Sensing. 2013. Vol. 5(12). P. 6481–6500. <https://doi.org/10.3390/rs5126481>.
15. Global Forest Change - Google Earth Engine : веб-сайт. URL: <https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change>.
16. Global Forest Monitoring Project GLAD : веб-сайт. URL: <https://glad.umd.edu/dataset/gfm/global-forest-monitoring-project>.
17. Global Forest Watch : веб-сайт. URL: <https://www.globalforestwatch.org/> (дата звернення 25.05.2025).
18. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science. 2013. Vol. 342 Id:6160. P. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>.
19. Kennedy, R. E. et al. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr. Remote Sensing of Environment. 2010. Vol 114(12), P 2897–2910.
20. Map Accuracy Assessment and Area Estimation: A Practical Guide. 2016. URL: <http://www.fao.org/3/a-i5601e.pdf>.
21. NASA Earthdata. GEDI Lidar : веб-сайт. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/gedi-lidar> (дата звернення 23.05.2025).

22. NASA. Understanding Forests After Fire With Landsat and LiDAR : веб-сайт. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/understanding-forests-after-fire-with-landsat-and-lidar/> (дата звернення 25.05.2025).
23. Roy D. P., Wulder M. A., Loveland T. R., et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 145. P. 154–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>.
24. Sannier C., McRoberts R. E., Fichet L. V. Suitability of Global Forest Change data to report forest cover estimates at national level in Gabon. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 173. P. 326–338.
25. SEPAL: веб-сайт. URL: <https://sepal.io/> (дата звернення: 29.05.2025).
26. Sentinel-2 User Guide. European Space Agency (ESA) : веб-сайт. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi> (дата звернення 25.05.2025).
27. Smith J., Brown R. Application of SAR Sensors for Forest Structure Analysis. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16(12), Article Id: 2204. <https://doi.org/10.3390/rs16122204>.
28. Turner M. G. et al. Forest Recovery Monitoring Using LiDAR and Multispectral Data. *Journal of Applied Ecology*. 2025. Vol. 62(5), Article Id: 14830. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14830>.
29. Turner M. G. et al. Forest Recovery Monitoring Using LiDAR and Multispectral : веб-сайт. URL: <https://www.nasa.gov/blogs/spacestation/2024/05/04/return-of-the-gedi-space-station-instrument-returns-to-forest-monitoring/> (дата звернення 25.05.2025).
30. Data and Methods | Global Forest Review - World Resources Institute : веб-сайт. URL: <https://gfr.wri.org/data-methods>.
31. Zhang Y., Wang J., Li X. Vegetation trend detection using time series satellite data as a proxy for ecosystem condition. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15(20), Article Id: 5032. <https://doi.org/10.3390/rs15205032>.