

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ**

Кафедра геодезії, землевпорядкування та кадастру

На правах рукопису

СТРУГОВ ВІКТОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

**ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ЗІМІН ЛІСОВОГО
ПОКРИВУ НІП ЦУМАНСЬКА ПУЩА**

Спеціальність: 193 Геодезія та землеустрій
Освітня програма Геодезія та землеустрій
Робота на здобуття другого (магістерського) освітнього рівня

Науковий керівник:
Мельник Олександр Валентинович
кандидат технічних наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНО ДО ЗАХИСТУ
Протокол №
засідання кафедри геодезії,
землевпорядкування і кадастру
Від .12.2024 р.

Завідувач кафедри
д.т.н., проф. А.В. Уль _____

ЛУЦЬК - 2024

Анотація

Стругов В.О. Дистанційний моніторинг змін лісового покриву НПП Цуманська пуща. Кваліфікаційна робота на правах рукопису. –ВНУ імені Лесі Українки, МОН України, Луцьк, –2024. - 45 с.

В магістерській роботі розглянуто методику дистанційного моніторингу лісових масивів на прикладі Національного природного парку Цуманська пуща. Проаналізовано метод контрольованої класифікації супутникових зображень CART (Classification And Regression Trees). Реалізовано на платформі Google Earth Engine алгоритм моніторингу втрат лісового покриву на період з 2001 по 2021 роки. Проаналізовано динаміку площ втрат лісів на обрану територію та часовий проміжок

Ключові слова: дистанційне зондування, контрольована класифікація, Landsat 7, Google Earth Engine, лісові масиви.

Annotation

Struhov V.O. Remote monitoring of forest cover changes in the Tsumanska Pushcha National Park. Qualification work on the rights of manuscript. - Lesya Ukrainka National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lutsk, - 2024. - 45 с.

The master's thesis deals with the methodology of remote monitoring of forests on the example of the Tsumanska Pushcha National Nature Park. The method of controlled classification of satellite images CART (Classification And Regression Trees) is analysed. An algorithm for monitoring forest cover loss for the period from 2001 to 2021 was implemented on the Google Earth Engine platform. The dynamics of deforestation areas for the selected territory and time period is analysed.

Keywords: remote sensing, supervised classification, Landsat 7, Google Earth Engine, forests.

ЗМІСТ

ВСТУП.....		4
РОЗДІЛ 1.	ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЛІСІВ УКРАЇНИ	6
1.1.	Традиційні методи моніторингу лісів	9
1.2.	Аналіз сучасного досвіду дистанційного моніторингу лісів ..	11
РОЗДІЛ 2.	ОСНОВИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ ...	15
2.1.	Особливості відображення лісів на космічних знімках	15
2.2.	Огляд відкритих даних дистанційного зондування для моніторингу лісів	17
2.3.	Веб-ресурси глобального моніторингу лісів	19
2.4.	Досвід картографування лісів України за супутниковими даними	22
РОЗДІЛ 3.	ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ЗМІН ЛІСОВОГО ПОКРИВУ НА ТЕРИТОРІЮ НПП ЦУМАНСЬКА ПУЩА	27
3.1.	Загальна характеристика об'єкту дослідження	27
3.1.2.	Клімат	28
3.1.3.	Поверхневі води	28
3.1.5.	Флора та фауна	28
3.2.	Супутники Landsat 7	29
3.3.	Хмарні сервіси Google Earth Engine	32
3.4.	Алгоритм контрольованої класифікації CART	34
3.5.	Оцінка точності.....	36
ВИСНОВКИ		39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		40
ДОДАТКИ.....		44

Вступ

Актуальність теми. Дослідження змін лісистості за допомогою дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) є надзвичайно актуальним, особливо у контексті глобальних екологічних змін та проблеми зменшення лісових масивів. Ліси відіграють важливу роль у збереженні біорізноманіття, регулюванні клімату, підтримці водного балансу та збереженні ґрунтів. Зміни у їх площях та структурі можуть мати значні наслідки для навколишнього середовища та соціально-економічного добробуту.

Актуальність використання ДЗЗ для моніторингу лісів полягає у можливості швидкого та точного отримання інформації про стан лісових масивів на великих територіях та у важкодоступних місцях. Супутникові дані, такі як з Landsat, Sentinel або MODIS, дозволяють аналізувати тенденції зміни лісистості у довгостроковій перспективі, визначати рівень деградації, процеси відновлення та зміни у виділах лісів. Використання алгоритмів на основі індексів рослинності, таких як NDVI та EVI, а також машинного навчання дозволяє значно покращити точність та деталізацію таких досліджень.

Крім того, дослідження змін лісистості є важливим для розробки стратегій з адаптації та пом'якшення наслідків кліматичних змін, забезпечення раціонального використання ресурсів та відновлення деградованих територій.

Об'єкт дослідження: Лісовий покрив в межах НПП Цуманська Пуща

Предмет дослідження: Методи і моделі дистанційного моніторингу лісових масивів

Мета дослідження: розробити методіку моніторингу лісових масивів з даними дистанційного зондування Землі

Мета цієї роботи передбачає виконання наступних **завдань:**

Проаналізувати стан лісового покриву на території НПП Цуманська Пуща
Здійснити одержання та подальшу обробку даних дистанційного зондування з відкритих джерел.

Здійснити контрольовану класифікацію та проаналізувати динаміку зміни лісистості на досліджуваній території

Методи дослідження — базуються на загальнонаукових методах спостереження, порівняння, вимірювання, аналізу та синтезу, дедукції, моделювання та систематизації отриманих результатів.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати магістерського дослідження можуть бути використані при розробки систем моніторингу як окремих лісових комплексів, так і лісового покриву регіонального рівня

Структура і обсяг роботи - Випускна кваліфікаційна робота складається із вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 44 найменування. Загальний обсяг роботи становить 44 сторінок основного тексту, у тому числі 12 рисунків.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЛІСІВ УКРАЇНИ

Українські ліси є важливим національним ресурсом, що забезпечує численні екосистемні послуги та сприяє підтримці біорізноманіття. Вони охоплюють близько 10 млн га, що становить понад 15% площі країни. Лісовий фонд включає 1160 масивів, де зростає понад 120 видів дерев і чагарників, переважно змішані та хвойні породи, як-от сосна, дуб, бук, ялина, смерека тощо [1].

Лісовий комплекс України відіграє важливу роль у підтримці екологічної рівноваги, надаючи такі екосистемні послуги, як захист ґрунтів, збереження водних ресурсів, кліматичне регулювання тощо [2]. Він також є джерелом деревини для будівництва, меблевої та інших галузей промисловості.

Водночас українські ліси стикаються з численними викликами, включаючи незаконні рубки, недостатнє фінансування для їхнього збереження та відновлення, вплив кліматичних змін і стихійні лиха. Для збереження цього важливого природного ресурсу необхідно впроваджувати ефективні заходи моніторингу та управління лісовими ресурсами. На рисунку 1.1 представлено розподіл загальної площі лісів України за основними категоріями власності, включаючи державні, комунальні та приватні ліси.



Рис. 1.1. Розподіл загальної площі лісів за категоріями

В Україні вкриті лісовою рослинністю ділянки поділяються на кілька категорій за переважаючими породами дерев. Основу українських лісів складають хвойні, широколистяні та мішані породи, причому кожна група має своє екологічне та економічне значення.

Хвойні ліси – найбільш поширеними хвойними породами є сосна та ялина. Соснові ліси займають найбільшу площу серед усіх хвойних масивів, поширюючись переважно на Поліссі та в Лісостепу. Вони відіграють ключову роль у збереженні піщаних ґрунтів і водних ресурсів. Ялинові ліси зустрічаються здебільшого в Карпатах, де сприяють стабілізації схилів і запобіганню ерозії ґрунтів.

Широколистяні ліси – домінуючими породами є дуб, бук та граб. Дубові ліси найбільше представлені в Лісостепу та на Поліссі, відомі своєю витривалістю та здатністю до регенерації, що робить їх цінним ресурсом для виробництва деревини. Букові ліси поширені в Карпатах і на Поділлі; вони мають важливе значення для збереження біорізноманіття й унікальних екосистем.

Мішані ліси – складаються з хвойних і широколистяних порід у різних співвідношеннях, переважно сосни та дуба. Такі ліси характерні для різних кліматичних зон України, особливо для півночі Лісостепу та частини Полісся. Мішані ліси є одними з найстійкіших до кліматичних змін завдяки поєднанню різних видів дерев з їхніми адаптаційними властивостями.

Розподіл лісових площ за породним складом має велике значення для раціонального лісокористування та охорони довкілля. Наприклад, хвойні ліси краще адаптовані до умов бідних ґрунтів, тоді як широколистяні краще збагачують ґрунти органічними речовинами. Цей поділ також важливий для планування заходів із відновлення лісів, підтримання екологічної рівноваги та зменшення ризиків деградації лісових екосистем.

Відсотковий розподіл за переважаючими породами наведено на рис. 1.2.

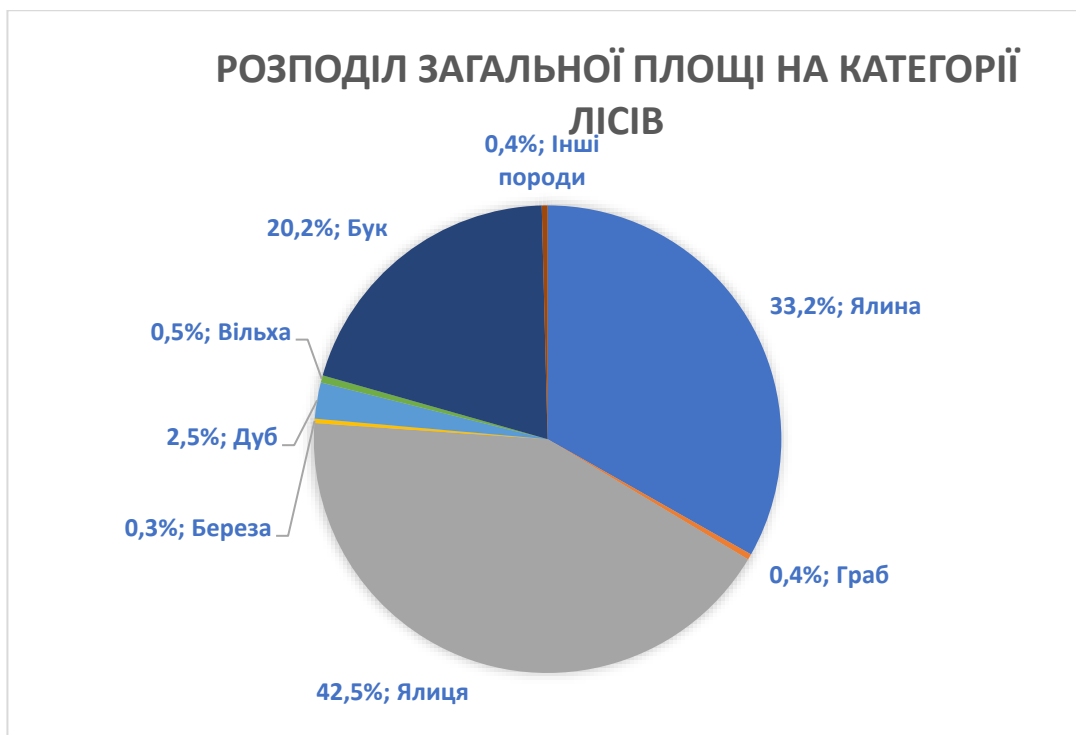


Рис 1.2. Поділ вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок за переважаючими породами.

Лісовий фонд України стикається з серйозними проблемами, серед яких незаконні рубки, недостатнє фінансування для охорони та відновлення лісів, а також погіршення якості ґрунтів і водних ресурсів через забруднення. Для ефективного збереження та відновлення лісових ресурсів важливо здійснювати регулярний моніторинг і розробляти стратегії управління лісами на всіх рівнях – від державного до місцевого.

Лісові ресурси України перебувають під значним тиском через потребу розширення деревообробної промисловості, зміни клімату, незаконні вирубки та недостатню підтримку для їх збереження. Вивчення особливостей і загальної характеристики лісів України є важливим для створення ефективних стратегій та програм з управління і збереження лісів, що забезпечать екологічно сталий розвиток країни та врахують інтереси як сучасного, так і майбутніх поколінь.

У Волинській області налічується 696 000 га лісових угідь, з яких 62% віднесено до лісів державного значення, 37,5% – до лісів, що належать сільськогосподарським підприємствам, 0,5% – до лісів, що належать іншим користувачам. Крім того, за їх господарським значенням ліси поділяються на дві

групи, а саме захисні ліси та експлуатаційні ліси, на які відповідно припадає 23% та 77% державного заповідника. Сучасний лісистість області становить 34,6%, найвища концентрація лісистості виявлена в Маневицькому районі (65% його території) та Камінь-Каширському районі (41%). Переважаючими типами лісів у регіоні є хвойні породи, які складають 60% лісів, за ними йдуть змішані ліси (береза, осика) (24%) та листяні ліси (16%). Лісові ресурси регіону є значними, вони становлять 16,2% від загального національного ресурсного потенціалу (НРП) і перевищують середнє по країні значення в чотири рази.

До основних факторів, що впливають на динаміку лісів, належать:

1. Незаконна вирубка лісу, яка є однією з найбільших проблем у регіоні. Це призводить до зменшення обсягів лісових насаджень та втрати біорізноманіття. На жаль, незважаючи на зусилля влади по боротьбі з цією проблемою, незаконні рубки тривають.

2. Також ліси Волині піддаються нападам різних шкідників та хвороб, які знижують їхню продуктивність та виживання. Особливо серйозну проблему викликає шкідник бабезиоз, який руйнує деревину і призводить до її втрати в якості господарського ресурсу.

3. Лісові пожежі становлять серйозну загрозу для лісових насаджень у Волинській області. Пожежі знищують великі площі лісів та інших природних ресурсів, а також забруднюють повітря та завдають шкоди здоров'ю людей.

4. Надмірна вирубка лісів, забруднення повітря та води, інша діяльність людини може призвести до руйнування екосистем, що знижує біорізноманіття та продуктивність лісів.

1.1. ТРАДИЦІЙНІ МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ

Моніторинг лісів передбачає систематичне спостереження за їх станом для ефективного управління та збереження лісових ресурсів. Він допомагає оцінити зміни в лісових екосистемах, виявити проблеми та розробити заходи для їх

вирішення. Традиційні методи моніторингу є ключовим інструментом для оцінки площі лісових масивів, їх структури та складу порід.

Одним із основних методів є облік лісових площ, що базується на використанні аерофотознімків та картографічних матеріалів. Цей підхід дозволяє фіксувати межі лісових масивів і відстежувати зміни їх площі у часі. Іншим поширеним методом є таксація лісів, яка включає визначення таких параметрів, як вік дерев, густина насаджень, склад і структура лісу. Таксація дає змогу оцінити зміни в лісовій структурі, зумовлені як природними, так і антропогенними факторами, і є важливою для підтримки біорізноманіття.

Крім того, важливими є методи оцінки здоров'я лісів, що включають визначення густоти насаджень, висоти дерев, розміру деревини, а також наявності хвороб і шкідників. Такі спостереження дозволяють вчасно виявляти загрози та запобігати їхньому поширенню.

Важливим методом є вибірковий районний облік, який дозволяє отримувати детальну інформацію про структуру та функціонування лісів на обмежених територіях. Це дає змогу створити розширену базу даних для подальшого аналізу та прогнозування.

Традиційні методи також включають моніторинг стану лісів на основі ознак хвороб та шкідників, що дозволяє ефективно контролювати їх поширення. Метеорологічні дані про температуру, опади та вологість також збираються для оцінки впливу кліматичних факторів на здоров'я лісу.

Однак, традиційні методи мають свої обмеження: вони часто потребують багато часу та ресурсів, а також мають обмежене охоплення. Тому сучасні технології, такі як геоінформаційні системи, супутникові знімки, дистанційне зондування та машинне навчання, стають дедалі більш популярними для підвищення точності, деталізації та ефективності моніторингу лісів.

1.2. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ДОСВІДУ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ

Приблизно 35 років тому Гільдебрандт (1987)[3] поставив питання, чи слід розглядати дистанційне зондування в лісовому господарстві як «іграшку чи інструмент». У вступних реченнях свого дослідження читач виявляє, що це саме питання вже ставилося ще 35 років тому (у 1950-х роках), коли розглядалося потенційне використання чорно-білих аерофотознімків для інформаційних потреб, пов'язаних з лісовим господарством у Центральній Європі. Хоча Гільдебрандт підкреслює, що в 1950-х роках вчені, які проводили дистанційне зондування, погодилися з тим, що дані дистанційного зондування, ймовірно, будуть корисними для лісового господарства, він також зазначає, що вони зіткнулися з широкою відсутністю інтересу серед більшості своїх колег. Тридцять п'ять років потому, в 1987 році, використання фотоінтерпретації для підтримки ведення лісового господарства було добре налагоджено і широко використовувалося; однак, знову ж таки, лише невелика група лісових експертів висловила інтерес до нових наборів даних дистанційного зондування космосу, доступних завдяки таким програмам, як Landsat та SPOT [4].

Тепер, через 35 років після Хільдебрандта (1987), дистанційне зондування стало набагато більш поширеною технологією в лісовому господарстві. Доступні продукти глобального лісового покриву та змін [5], а також продукти лісового порушення, що охоплюють значну частину континентів і періоди часу, що охоплюють кілька десятиліть[6] Крім того, для регіонів різного розміру генеруються карти та продукти даних, що представляють типи лісів або види дерев, отримані з часових рядів вільно доступних пасивних оптичних супутникових даних [7].

Ці типи продуктів, у свою чергу, використовуються в деяких юрисдикціях для покращення оцінок офіційних національних програм відбору проб, таких як національні інвентаризації лісів, і для надання просторово чітких оцінок лісових атрибутів [7–9].

У деяких регіонах виявлення та визначення дальності за допомогою повітряного світла (LiDAR), а також цифрова аерофотограмметрія (DAP) стали незамінними технологіями для картографування структури лісу та ключовою допоміжною інформацією для покращення оцінок лісових атрибутів, що надаються інвентаризацією лісів [10–13]. Оптичні супутники з точною просторовою роздільною здатністю, деякі з яких працюють у сузір'ях кількох мікросупутників, надають просторово деталізовані дані з високим часовим переглядом, який може дедалі більше відповідати інформаційним вимогам, пов'язаним із реагуванням на надзвичайні ситуації або події порушення [14–18]. Окрім цих традиційних застосувань дистанційного зондування, з'явилися нові технології та платформи, включаючи дрони [19–23] та безпосереднє зондування, таке як наземне та мобільне лазерне сканування [24–28] і датчики, пов'язані з розумними пристроями [29–32], швидко еволюціонували. Ці технології сприяють розробці нових додатків та інноваційних підходів, придатних для оцінки різноманітного спектру лісових атрибутів у полі.

Як дисципліна, наука дистанційного зондування часто зосереджена на конкретному джерелі даних або методологічній розробці, а не на цінності або корисності отриманої інформації, остання з яких є більш важливою з точки зору сприйняття користувачами. Крім того, використання нових і нових технологій часто обмежується витратами і технічними можливостями.

Дослідження та ініціативи, спрямовані на покращення використання існуючих технологій дистанційного зондування Землі в оперативному використанні, повинні враховувати місцевий контекст та існуючі низькі показники роботи в лісовій промисловості та адмініструванні програм, що стосуються лісового господарства. Наприклад, у Німеччині плани управління лісами ґрунтуються на детальних інвентаризаціях полів, які проводяться кожні 10 років. Протягом останніх кількох десятиліть ця інформація сприймається як достатня база даних для планування лісових операцій. Однак сьогодні лісівники дедалі більше занепокоєні зміною динаміки в німецьких лісах як наслідок екстремальних погодних умов та пов'язаної з ними шкоди лісам [33]. Швидкі

темпи змін можуть означати, що інформація, надана 10-річними планами лісів, швидко застаріває і вже не точно характеризує реальність на місцях. Дійсно, доступ до своєчасної інформації для оновлення лісових планів та/або скорочення циклу інвентаризації стає все більш цікавим у багатьох юрисдикціях.

Ступінь, до якого дані дистанційного зондування можуть надати необхідну інформацію для задоволення цих інформаційних потреб, була предметом десятиліть досліджень, які розвивалися разом із швидкими змінами в технологіях. Нещодавно були висловлені пропозиції щодо рамок оперативного моніторингу для регулярного оновлення існуючої інформації про запаси [34], і тривають дослідження методів, які можуть це зробити, таких як підходи до асиміляції даних [35]. Однак це дослідження завжди слід розглядати в контексті місцевого ведення лісового господарства. Наприклад, управління лісовим господарством у значній частині Європи все більше зосереджується на стратегіях управління нерівномірним лісовим господарством у змішаних лісових насадженнях з додатковим акцентом на точне лісівництво з одним деревом (окремі високоякісні деревні дерева є основною продуктивною метою). У таких умовах інформаційні потреби практиків можуть дедалі більше відхилятися від інформації, що надається типовими інвентаризаціями лісів, і можуть виникнути необхідні удосконалення як традиційних підходів до інвентаризації на основі полів, так і типових підходів дистанційного зондування на основі території, які надають інформацію за роздільною здатністю підстану, але не на рівні окремого дерева.

На противагу цьому, управління лісовим господарством у країнах, які дотримуються екстенсивного підходу до управління лісами, стикається з іншими проблемами [36]. Наприклад, Канада має велику лісову площу, щільність мереж польових ділянок невелика, а територія, для якої потрібна інформація про ліси, помітно більша і менш доступна. Крім того, враховуючи юрисдикційне управління лісами в Канаді, кожна юрисдикція розробляє та впроваджує власну програму інвентаризації лісів, використовуючи тимчасові та постійні інвентаризаційні ділянки, виявлені та інвентаризовані на місцях, а також з

даними дистанційного зондування (переважно аерофотознімками). Щоб подолати відмінності в юрисдикційних програмах та забезпечити надійну статистику лісів на національному рівні, на додаток до програм інвентаризації лісів на рівні юрисдикції впроваджується національна інвентаризація лісів на основі вибірки (NFI) [37].

Зі збільшенням доступності легкодоступних даних дистанційного зондування в поєднанні з (хмарними) готовими рішеннями для отримання картографічних продуктів на основі цих даних, навіть недосвідчені користувачі сьогодні можуть створювати карти на основі дистанційного зондування. Таким чином, для наукової та користувацької спільноти надзвичайно важливо продовжувати розробку та поширення стандартів якості карт, які об'єктивно повідомляють про невизначеності, пов'язані з цими картографічними продуктами. Відсутність таких стандартів може призвести до ризику негативного впливу на прийняття рішень і, в свою чергу, підриву сприйняття цінності інформації, отриманої дистанційним зондуванням Землі. Розробка таких стандартів не є простою і в деяких випадках може вимагати методологічних удосконалень (наприклад, адекватного врахування варіативності прогнозування на великих площах, оцінок лісових атрибутів і навіть залишкової мінливості, коли цільові ділянки невеликі).

Крім того, необхідні освітні зусилля для ознайомлення нинішніх та майбутніх фахівців, які працюють у галузі дистанційного зондування та лісового господарства, з важливістю відповідних дизайнів вибірки та необхідністю статистичних знань для правильної кількісної оцінки та розуміння невизначеностей у картографічній продукції. Користувачі будуть користуватися продуктами, які є в наявності. Як зазначено тут, існує безліч дослідницьких питань, пов'язаних з характеристикою невизначеності карти, які заслуговують як на подальше вивчення, так і на покращення комунікації з кінцевими користувачами та зацікавленими сторонами.

РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ

2.1. ОСОБЛИВОСТІ ВІДОБРАЖЕННЯ ЛІСІВ НА КОСМІЧНИХ ЗНІМКАХ

Застосування космічних знімків дозволяє отримувати точну та об'єктивну інформацію про лісові екосистеми, їх стан і зміни, що є важливим для ефективного управління та збереження лісових ресурсів. Характеристики картографування лісів на основі космічних даних надають цінну інформацію для різних цілей.

Завдяки аналізу кольору на космічних знімках можна визначити типовий зелений відтінок лісу, оскільки хлорофіл, основний пігмент у рослинах, відбиває зелений спектр. Це дозволяє ідентифікувати лісові масиви та відобразити їх розподіл на карті.

Космічні знімки також надають дані про густоту лісу: більш густі ділянки мають темніший відтінок через велику кількість листя та гілок, що блокують світло. Таким чином, можна визначити території з високою щільністю рослинності, які вважаються екологічно стійкішими та здоровішими, як це показано на рисунку 2.1.



Рис. 2.1 Приклад роботи NDVI для розпізнання здорових та хворих рослин.

Космічні знімки також дозволяють детально аналізувати структуру лісу. Застосування різноманітних алгоритмів обробки даних дає змогу ідентифікувати різні види дерев, виявляти крони, окремі дерева, дороги та інші елементи. Це сприяє оцінці різноманіття лісових екосистем, визначенню проблемних зон та прийняттю рішень для їх відновлення та захисту (рис. 2.2).

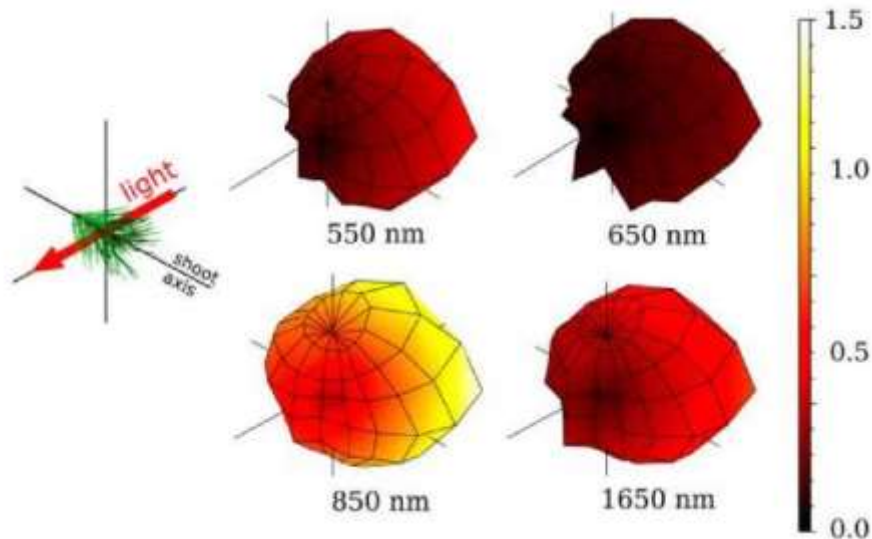


Рис. 2.2 Функції фази розсіювання зразка пагонів сосни звичайної на чотирьох довжинах хвилі. Діаграма у верхньому лівому куті ілюструє геометрію освітлення.

Важливий аспект використання космічних знімків — моніторинг змін у лісовому покриві. Порівняння знімків, зроблених у різні періоди, дозволяє простежити динаміку вирубки лісів, поширення хвороб, шкідників та зміну площ лісових масивів. Ця інформація є цінною для прийняття рішень щодо охорони та відновлення лісів.

Крім того, космічні знімки допомагають виявляти лісові пожежі та визначати їхні масштаби. Зміни кольору і структури на зображенні можуть вказувати на наявність пожежі та її поширення, що дозволяє оперативно реагувати та мінімізувати наслідки (рис. 2.3, де представлені спектри відбиття компонентів деревини, таких як стовбури та кора).

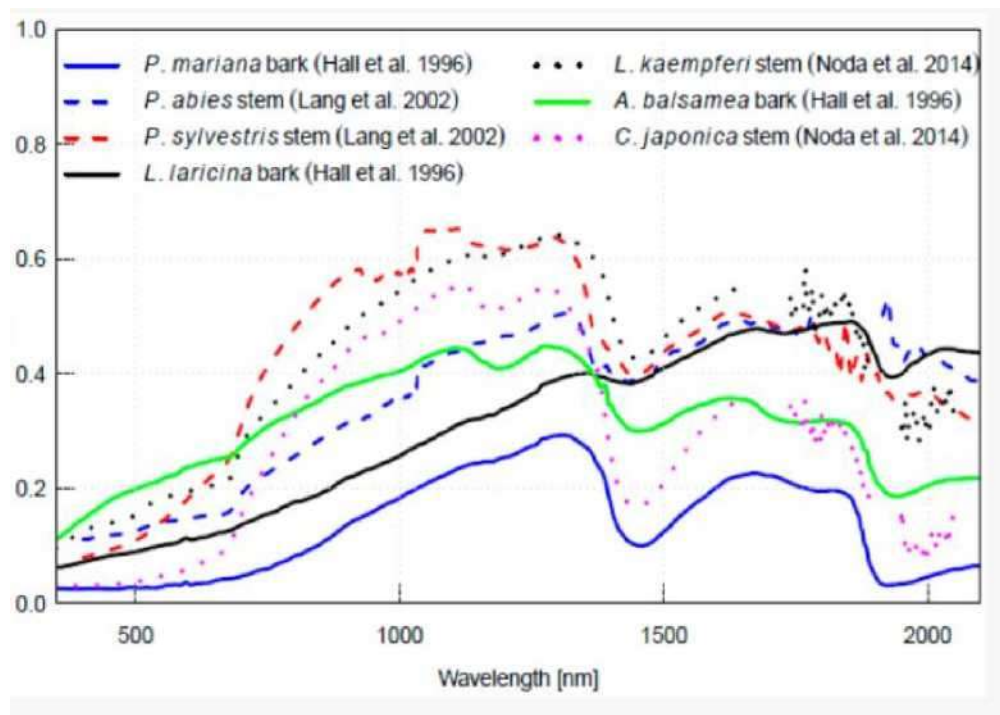


Рис. 2.3 Спектри відбиття деревних компонентів (стебла дерева або шматків кори).

Загалом, космічна зйомка є потужним засобом для вивчення і моніторингу лісових ресурсів. Вона надає об'єктивну та детальну інформацію про стан лісів і їхні зміни, сприяючи прийняттю ефективних рішень для управління, захисту та відновлення лісів. Використання космічних знімків підтримує збереження лісових ресурсів, екологічну стійкість та збалансований розвиток.

2.2. ОГЛЯД ВІДКРИТИХ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ

Космічний моніторинг лісів — це метод спостереження за лісовими екосистемами із застосуванням супутників та інших космічних апаратів, що забезпечує об'єктивну, швидку та глобальну інформацію про стан і зміни в лісових регіонах. Одним із головних джерел таких даних є супутникові знімки. Супутники, як-от Landsat, Sentinel і MODIS, надають інформацію про покриття лісу, типи дерев, щільність насаджень та динаміку змін площі лісів. Ці дані є важливими для оцінки стану лісів, виявлення вирубок, аналізу змін покриття, прогнозування пожеж та оцінки екологічних тенденцій.

Окрім супутникових зображень, до джерел даних космічного моніторингу відносяться радарні (SAR), лідарні та інфрачервоні зображення, що дозволяють отримувати детальні відомості про висоту дерев, структуру лісу та інші параметри для комплексного аналізу лісових екосистем.

Сфера застосування космічного моніторингу лісів є досить широкою. Він використовується для відстеження змін у лісових регіонах, виявлення незаконних рубок, планування лісових ресурсів, вивчення впливу кліматичних змін на екосистеми, оцінки біорізноманіття та ефективності програм збереження лісів.

Космічний моніторинг є ефективним інструментом для отримання даних про стан лісів планети, що сприяє реалізації стратегій сталого управління та збереження лісових ресурсів для майбутніх поколінь. Сьогодні доступні різні відкриті дані дистанційного зондування, що використовуються в наукових і дослідницьких цілях.

Дані від місій, таких як Landsat, Sentinel і MODIS, охоплюють видимий, інфрачервоний та мікрохвильовий діапазони, що дозволяє вивчати зміну лісового покриву, визначати вирубки та оцінювати стан деревного покриву.

Лідарна технологія використовує лазерне випромінювання для визначення висоти лісових масивів. Лідарні дані, зокрема від проєкту Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI), дають змогу оцінювати біомасу, запаси вуглецю та інші характеристики лісу.

Радіометри вимірюють електромагнітне випромінювання, відбите чи випромінене лісами. Ці дані застосовуються для аналізу вмісту вологи, біомаси та типу рослинності.

Global Forest Watch [38] та інші відкриті ресурси надають дані про глобальні зміни лісового покриву, вирубку лісів та інші екологічні показники.

Ці відкриті дані дистанційного зондування є важливими для дослідників, науковців та організацій, що займаються моніторингом і збереженням лісових ресурсів. Вони сприяють аналізу змін у лісових екосистемах, виявленню загроз та розробці ефективних стратегій захисту та збереження лісів.

2.3. ВЕБ-РЕСУРСИ ГЛОБАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ

Для глобального космічного моніторингу лісів існує безліч веб-ресурсів, які забезпечують доступ до відкритих даних та інструментів для аналізу лісових масивів за допомогою супутникових зображень. Ось деякі з них:

1. Global Forest Watch (globalforestwatch.org): цей портал пропонує доступ до глобальних даних про лісовий покрив, зміни в лісах, очищені території, лісові пожежі та інші параметри. Інтерактивні карти та аналітичні інструменти дозволяють спостерігати за лісовими екосистемами та контролювати їхній стан. Візуалізація цього ресурсу представлена на Рис. 2.4.

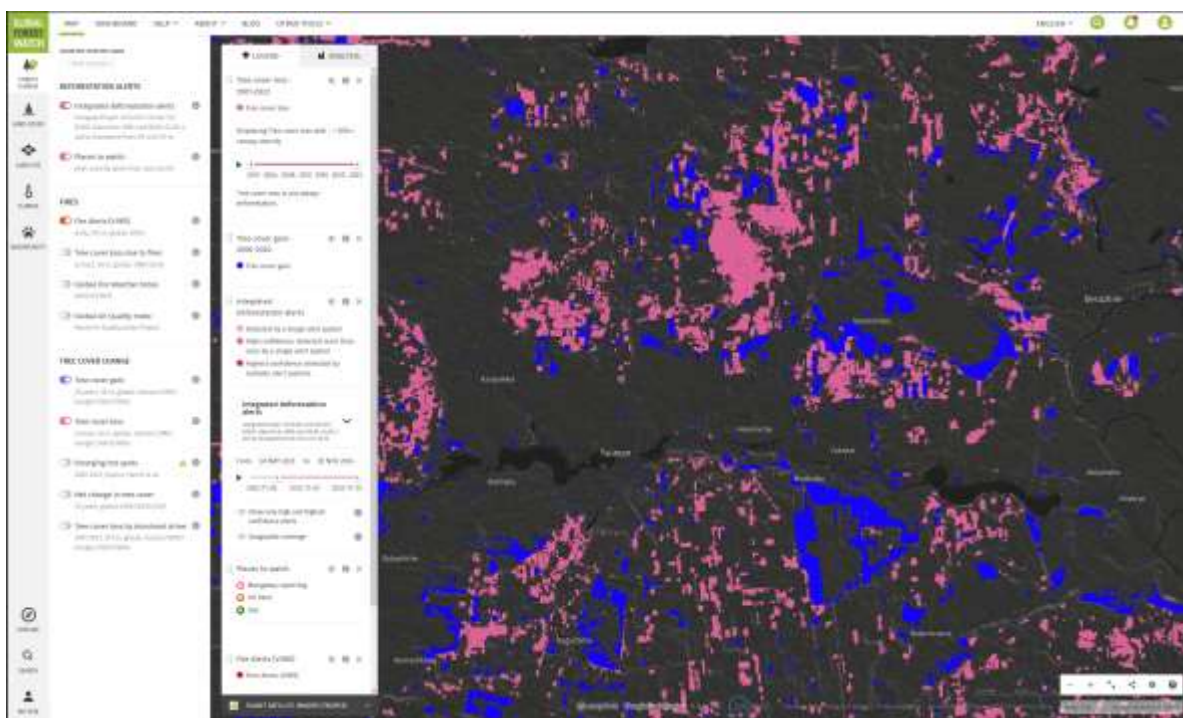


Рис. 2.4. Ресурс Global Forest Watch на територію навколо селища Цумань

2. Система даних та інформації NASA (EOSDIS) (earthdata.nasa.gov): цей ресурс забезпечує доступ до великої кількості космічних даних, включаючи супутникові зображення, які можна використовувати для моніторингу лісів. Тут можна знайти дані з різних супутникових місій, таких як Landsat, MODIS, Sentinel та інших.

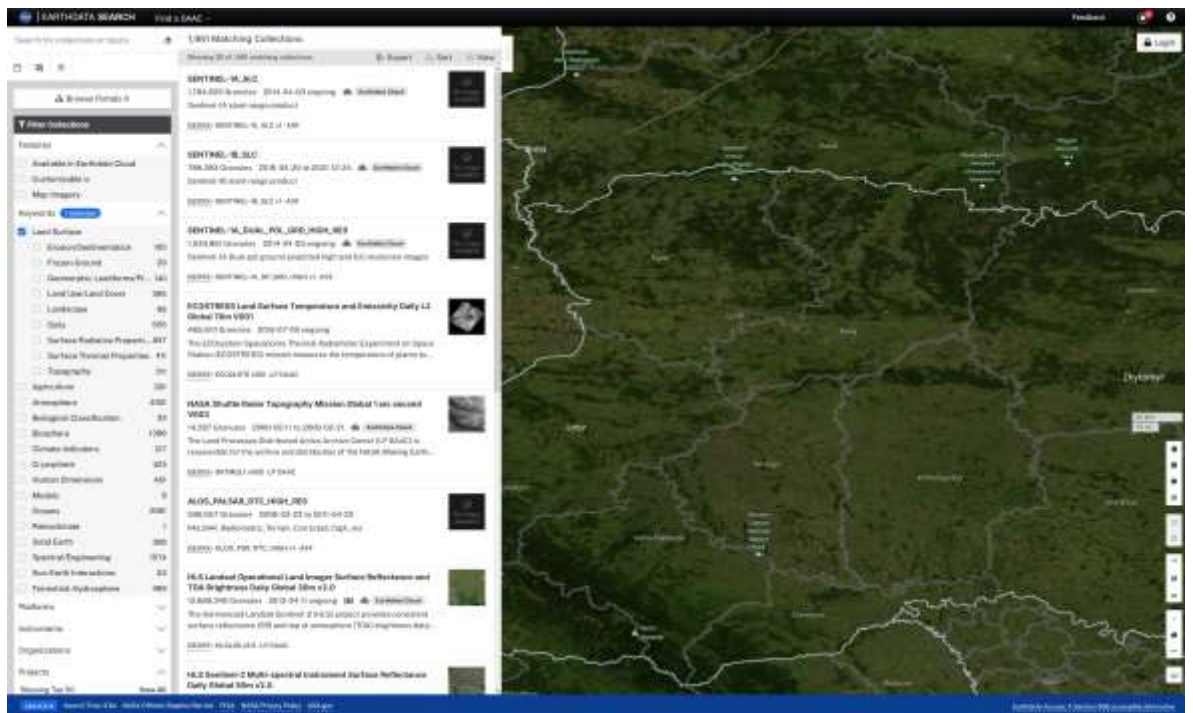


Рис. 2.5. Ресурс earthdata.nasa.gov.

3. Ініціатива зміни клімату (CCI) Європейського космічного агентства (ESA) (climate.esa.int/en/projects/forests): цей проект ESA надає дані про індекс лісів, отримані із космосу, для вивчення глобальних змін у лісах. Ресурс містить інформацію про методологію, доступ до даних та аналітичні інструменти.



Рис. 2.6. Ініціатива зміни клімату (CCI) Європейського космічного агентства (ESA)

4. Портал відстеження вуглецю в лісах (fct.pml.ac.uk): розроблений Плімутською морською лабораторією, цей портал пропонує доступ до супутникових даних про запаси вуглецю в лісах, що дозволяє вивчати зміни запасів вуглецю та їх роль у кліматичній системі.

5. Global Land Analysis and Discovery (GLAD) (glad.umd.edu): цей ресурс, розроблений Університетом Меріленда та Google, надає доступ до останніх даних про вирубку лісів за допомогою супутникових зображень, що дозволяє відстежувати зміни в лісовому покриві в режимі реального часу. Функціонал сайту представлений на Рис. 2.7.

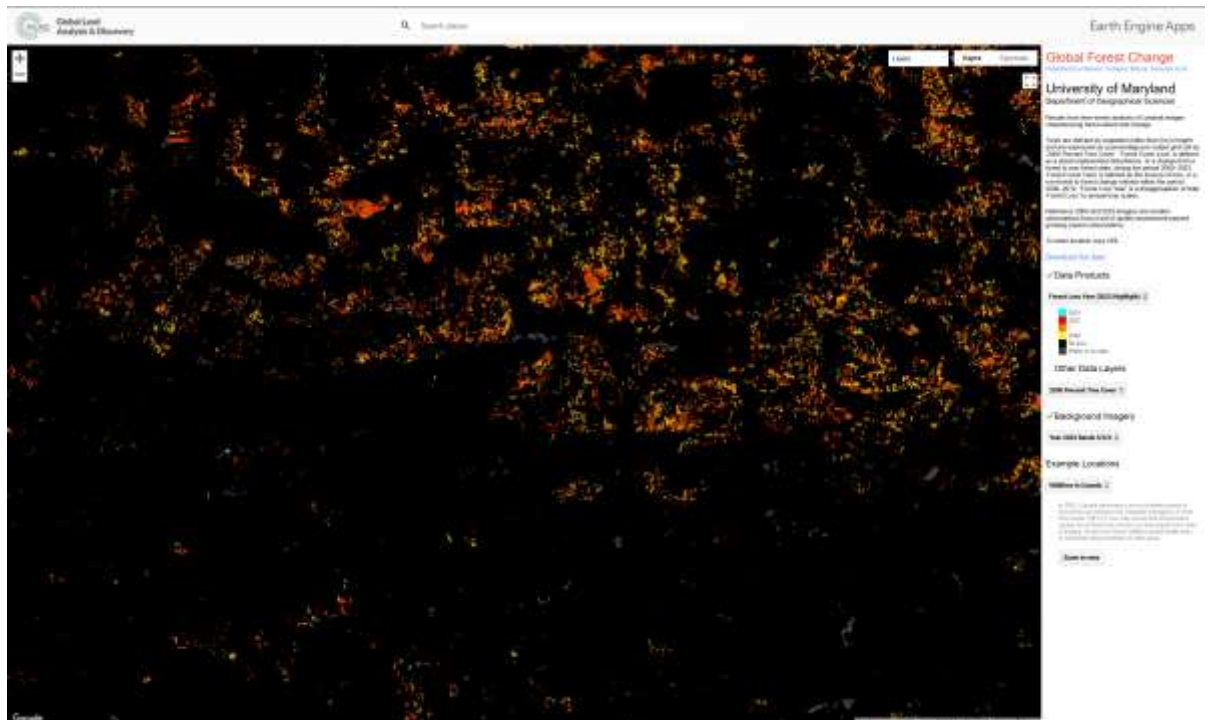


Рис. 2.7. Global Land Analysis and Discovery (GLAD)

Ці ресурси відкривають можливості для дослідження лісових екосистем за допомогою супутникових знімків і відкритих даних, допомагаючи виявляти зміни в лісистості, ідентифікувати знелісенні ділянки, а також оцінювати стан лісів і їхню значимість для збереження.

Окрім вказаних веб-ресурсів, існують й інші джерела, які можуть бути корисними для глобального космічного моніторингу лісів:

Всесвітній центр моніторингу охорони природи ЮНЕП (www.unep-wcmc.org)**: цей центр надає доступ до геопросторових даних та інформації про лісовий покрив з усього світу, включаючи інструменти для аналізу та візуалізації даних.

Global Forest Watch Canada (www.globalforestwatch.ca)**: цей ресурс спеціалізується на моніторингу лісів у Канаді та пропонує дані та інструменти для аналізу лісових екосистем в цій країні, включаючи інформацію про зміни лісів, очищені території та лісові пожежі.

Global Forest Watch Commodities (commodities.globalforestwatch.org)**: цей ресурс слугує для відстеження зв'язків між лісовими масивами та глобальними постачальниками товарів, таких як деревина, пальмова олія та соєві боби, а також оцінки їхнього впливу на лісовий покрив.

Багато країн мають власні веб-ресурси для моніторингу лісів. В Україні, наприклад, можна звернутися до Державного космічного агентства (www.nkau.gov.ua) або Центру космічних досліджень і телекомунікацій (www.space.gov.ua) для отримання інформації про проекти та дані, пов'язані з моніторингом лісів.

Ці ресурси пропонують широкий спектр інформації, інструментів та даних для космічного моніторингу лісів, допомагаючи вивчати зміни в лісових екосистемах, виявляти загрози, впливати на прийняття рішень щодо їх збереження та сприяти сталому лісокористуванню.

2.4. ДОСВІД КАРТОГРАФУВАННЯ ЛІСІВ УКРАЇНИ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

Досвід супутникового картографування лісів України є ключовим інструментом для моніторингу та управління лісовими ресурсами. Завдяки сучасним технологіям дистанційного зондування, зокрема супутниковим знімкам, стало можливим отримання детальної інформації про стан і зміни лісового покриву.

Процес картографування лісів за допомогою супутникових даних включає кілька етапів:

1. Збір даних: Супутникові зображення, що містять інформацію про лісовий покрив, отримують з різних джерел, таких як Landsat, Sentinel, MODIS та ін. Ці дані мають різні просторові та спектральні характеристики, що дозволяє отримувати різноманітну інформацію про лісові екосистеми.

2. Попередня обробка: Супутникові зображення підлягають обробці, що включає калібрування, виправлення геометричних спотворень, видалення шумів та інші етапи. Це підвищує якість зображення та зменшує спотворення, які можуть виникати через різні помилки.

3. Класифікація: Зображення підлягають класифікації, під час якої різні типи ландшафтів, включаючи ліси, виділяються на основі їх спектральних характеристик. Це може включати застосування алгоритмів машинного навчання, які автоматично розпізнають і класифікують лісовий покрив на зображеннях.

4. Перевірка: Результати класифікації перевіряються шляхом порівняння з наземними спостереженнями або іншими даними, що дозволяє оцінити точність картографічних результатів і виправити виявлені помилки.

5. Аналіз та інтерпретація: Отримані дані використовуються для аналізу змін, виявлення вразливих територій, моніторингу розташування і розміру лісів, а також оцінки їх стану і здоров'я. Ці дані є важливим інструментом для прийняття рішень щодо управління та збереження лісових ресурсів.

Супутникове картографування лісів надає об'єктивну та детальну інформацію про лісовий покрив, визначає зміни та тенденції, що впливають на ліси, а також забезпечує наукову основу для ухвалення рішень щодо їх збереження та сталого використання.

Окрім картографування, використання супутникових даних для моніторингу лісів в Україні охоплює такі аспекти:

- Виявлення змін у лісовому покриві: Супутникові дані можуть виявити зміни, такі як вирубка, знищення або зростання лісів, що дозволяє визначити території, які потребують особливого контролю чи втручання.

- Оцінка лісового фонду: Ці дані допомагають оцінити лісовий фонд, включаючи кількість дерев, їх щільність і розташування, що важливо для розрахунку обсягів деревини та оптимізації управлінських підходів.

- Моніторинг забруднення та наслідків: Супутникові дані використовуються для виявлення забруднень, таких як викиди промисловості чи спалювання лісів, а також для оцінки впливу зміни клімату на лісові екосистеми.

- Моніторинг землекористування: Дані дозволяють стежити за змінами землекористування в лісистих районах, такими як зміна меж лісів чи перетворення лісів на сільськогосподарські землі, що сприяє контролю за використанням земельних ресурсів.

Використання супутникових даних для моніторингу лісів покращує ефективність управління лісовими ресурсами, сприяє збереженню біорізноманіття та сталому розвитку природних екосистем.

Застосування даних дистанційного зондування для дослідження лісів України розпочалося в 1990-х роках завдяки розвитку геоінформаційних систем та комп'ютерних технологій, що забезпечило нові можливості для аналізу цифрових даних дистанційного зондування.

Першими фахівцями, які використовували багатозональні знімки для оцінки екологічного стану лісів, стали вчені Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геофізики НАН України. Наприклад, знімок SPOT-4 від 23 серпня 1995 року дозволив виявити різні типи лісів та зараження соснових лісів у зоні відчуження Чорнобильської АЕС.

Розроблено новий метод топографічної корекції даних багатозонних космічних знімків для класифікації лісового покриву в гірських районах, що дозволяє адаптувати яскравість пікселів зображення залежно від освітленості схилів.

Дослідження можливостей використання даних відеоспектрометра MERIS для класифікації ґрунтового покриву Українських Карпат показали, що супутниковий знімок ENVISAT MERIS забезпечує середні результати, але добре розрізняє хвойні ліси та засніжені вершини. Використання багатозональних індексів REP і MTCI виявилось ефективнішим, ніж класифікація на основі відбиття.

У співпраці з Міжнародним інститутом прикладного системного аналізу проводились дослідження стану лісових масивів України та Сибіру, а також оцінка кругообігу вуглецю.

Загалом дані дистанційного зондування надають важливу інформацію про стан лісових масивів, їх структуру та екологічні параметри, що сприяє ефективному моніторингу та обґрунтованому управлінню лісовими ресурсами.

Розшифровка супутникових знімків дозволяє визначити вікові категорії лісів, що важливо для класифікації різних типів насаджень. Дослідники використовують супутникові знімки, включаючи ENVISAT MERIS та Landsat, для оцінки стану лісів і аналізу змін лісистості за роки.

Для покращення точності обробки супутникових знімків застосовуються методи геометричної корекції, ортотрансформації та сегментації зображення, що забезпечує точніші результати.

Дослідження також включають аналіз змін у лісовому покриві Українських Карпат на основі зображень Landsat та офіційної статистики, виявляючи зміни через незаконні рубки та природне відновлення лісів, що аналізується в контексті переходу до сталого лісового господарства.

Космічні сканування Landsat допомагають розрізняти різні класи лісових угідь, включаючи листяні та хвойні ліси, що сприяє ідентифікації різних типів лісів та елементів природних екосистем.

Розглядаються також методи декодування даних радіолокації із синтезованою апертурою для оцінки таксаційних параметрів лісів. Вивчення інфраструктури окремих деревних порід дозволяє досягти високої точності дистанційної оцінки.

Збираючи, систематизуючи та обробляючи дані, Національне космічне агентство України (НКАУ) та підвідомчі установи, такі як Науково-виробничий центр аерокосмічної інформації «Природа», отримують інформацію про стан лісових екосистем, яка використовується для управління ресурсами та збереження біорізноманіття.

Центр дистанційного моніторингу лісів, що є структурним підрозділом Державного агентства лісових ресурсів України, також здійснює моніторинг лісового покриву, оцінюючи масштаб незаконних рубок та зміну лісистості.

Моніторинг на базі супутникових знімків забезпечує об'єктивний підхід до управління лісами, сприяє ефективному використанню лісових ресурсів і збереженню природних екосистем.

На сьогодні існує ряд публікацій українських вчених що висвітлюють новітні результати в даній галузі [39–41].

РОЗДІЛ 3. ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ЗМІН ЛІСОВОГО ПОКРИВУ НА ТЕРИТОРІЮ НПП ЦУМАНСЬКА ПУЩА

3.1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ківерцівський національний природний парк «Цуманська Пуща» є національним природним парком України, що знаходиться у Ківерцівському районі Волинської області, в межах однойменного лісового масиву неподалік селища Цумань, між ріками Стир та Горинь. Площа парку становить 43% від загальної території Цуманської пущі.

На основі Указу Президента України №203 від 22.02.2010 року, що стосується створення національного природного парку «Цуманська пуща», та відповідно до наказу міністра екології та природних ресурсів України №523 від 12.12.2011 року, парк було офіційно зареєстровано 23.09.2015 року в Єдиному державному реєстрі.

Термін «пуща» у слов'янських мовах вказує на великий, цілісний лісовий масив, що зберігся в майже первозданному вигляді. Цуманська пуща розташована між $50^{\circ} 45'$ і $51^{\circ} 03'$ північної широти, а також між $25^{\circ} 3'$ і $26^{\circ} 07'$ східної довготи, займаючи загалом приблизно 80,000 гектарів (0,8 тис. км²). Площа Ківерцівського національного природного парку «Цуманська пуща» становить 34,467.89 гектарів, з яких 3,472.71 гектарів передані для постійного користування, а 30,995.18 гектарів включені без вилучення у землекористувачів.

3.1.1. Тектонічна, геологічна та геоморфологічна будова

У тектонічному плані Цуманська пуща розташована на Волино-Подільській плиті, яка є частиною Східноєвропейської платформи. Її фундамент складають магматичні та метаморфічні породи архейського і ранньопротерозойського віку, розділені на окремі блоки.

Парк охоплює дві геоморфологічні зони: на півночі це Поліська низовина, а на півдні — крайня північна частина Волинської височини. Переважна частина території парку входить до Рожище-Цуманського денудаційного району, де

переважають крейдові масиви, підвищені до 200 м, на яких сформувалися родючі перегнійно-карбонатні ґрунти. Найнижча точка парку — 163 м над рівнем моря, а найвища — 210 м.

3.1.2. Клімат

Цуманська пуша відноситься до західної частини атлантико-континентальної кліматичної області Європи, що забезпечує помірно-континентальний клімат. Тут переважають атлантичні повітряні маси, хоча іноді проникає холодне арктичне повітря.

Клімат характеризується відносно високою вологістю, помірно вологим літом і м'якою зимою. Середня річна кількість опадів становить приблизно 600 мм, а середні температури в січні та липні — відповідно -5°C та $+18^{\circ}\text{C}$.

3.1.3. Поверхневі води

Територія парку входить до басейну річки Прип'ять, зокрема до басейнів її приток Стиру і Горині. Найбільша річка, що протікає парком — Горинь. На території також розташовані численні річки та стави, а також Чортове болото з мережею каналів.

3.1.4. Ґрунти

Переважаючими ґрунтами є дерново-підзолисті, включаючи оглеєні, а також болотно-лучні та низинні торфовища. Наявність рівнинного рельєфу і слабкий дренаж ґрунтів обумовлюють їхню малоприсадибність для сільського господарства, що сприяє збереженню лісової рослинності.

3.1.5. Флора та фауна

Флора Цуманської пуші представлена широколистяними та сосновими лісами, серед яких зустрічаються рідкісні види рослин і тварин. Тут зростає дугласія, а також є багато охоронюваних видів, занесених до Червоної книги України.

Цікавим фактом є те, що на території парку мешкає один з небагатьох в Україні стадів зубрів. У фауні переважають лісові види, а також є багато рідкісних і захищених видів тварин.

Цей парк є важливим екологічним і туристичним об'єктом, що сприяє збереженню біорізноманіття та охороні природних ресурсів.

3.2. СУПТНИКИ LANDSAT 7

Landsat-7 — супутник дистанційного зондування Землі, запущений в рамках програми Landsat. Він виведений на орбіту в 1999 році і досі продовжує свою роботу. Основною метою супутника було оновлення глобального архіву супутникових знімків. Хоча програма Landsat контролюється NASA, обробка та розповсюдження даних здійснюється Геологічною службою США. Зображення, отримані з Landsat-7, використовуються в програмі NASA World Wind та на більшості картографічних сервісів, таких як Google Maps, Yahoo! Maps, Bing Maps.

Супутник має декілька партнерів, які обертаються на близьких орбітах з інтервалом кілька хвилин: Earth Observing-1, SAC-C та «Терра». Цю групу супутників іноді називають «ранкове сузір'я». Спочатку проекти Landsat-6 та Landsat-7 фінансувалися Міністерством оборони США для військових цілей, але у грудні 1993 року фінансування було припинено, і увага переключилася на застарілий на той момент Landsat-5.

Загалом інвестиції в проект перевищили 700 мільйонів доларів до 2003 року.

Місія Landsat-7 була запланована на термін 5-7 років. Супутник здатен знімати та передавати до 532 зображень на добу. Він перебуває на полярній сонячно-синхронній орбіті, що забезпечує його проліт над усією поверхнею планети. На висоті 705 км для повного сканування поверхні потрібні 232 оберти, або 16 днів. Зйомка місцевості відбувається приблизно о 10 годині ранку за місцевим сонячним часом.

Траєкторія підтримується шляхом маневрів з точністю ± 5 км. Схема треку має позначення WRS (Worldwide Reference System) і ділить поверхню планети на 233 стовпці (відповідає орбіті) і 248 рядів.

Маса супутника становить 1973 кг, його довжина — 4,3 м, діаметр — 2,8 м. На відміну від попередніх апаратів програми, які використовували магнітну стрічку, на Landsat-7 встановлений твердотільний масив пам'яті обсягом 378 гігабіт (приблизно 100 зображень). Основним інструментом для отримання зображень є Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), розроблений компанією Raytheon.

3.2.1. Основні характеристики ETM+:

- Сканування за допомогою рухомого дзеркала (7 циклів на секунду);
- Полоса захвату: 185 км (кут зору 15°);
- Телескоп: рефлектор системи Річі — Крет'єна з двома дзеркалами зі скла з низьким коефіцієнтом розширення (ULE);
- Діаметр апертури телескопа: 40,6 см; фокусна відстань: 243,8 см; відносне отвір: $f/6.0$;
- Розміри сканера: $1,5 \times 0,7 \times 2,5$ м; вага: 300 кг;
- Панхроматична камера з роздільною здатністю 15 метрів;
- Інфрачервона камера з роздільною здатністю 30 метрів (6 каналів);
- Температурний сенсор (дальній ІК-діапазон) з роздільною здатністю 60 метрів.

Фокальна площа поділена на основну та «холодну» частини. У основній частині містяться 32 кремнієвих фотодіода (SiPD) панхроматичного діапазону та 4 групи по 16 фотодіодів видимого і ближнього інфрачервоного діапазону. У холодній частині, охолоджуваній до 91 К, розташовані 2 групи по 16 фотодіодів на антимоніді індію (InSb) коротковолнового інфрачервоного діапазону та 8 фотодіодів на теллуридї ртуті-кадмію (HgCdTe) теплового ІК-діапазону.

Для зв'язку з Землею використовуються 2 ненаправлені антени S-діапазону та 3 антени X-діапазону. Протокол зв'язку сумісний з CCSDS 701.0-B-1.

Також велись роботи над проектуванням чотириканального сенсора HRMSI (мультиспектральний стереосенсор оптичного і ближнього інфрачервоного діапазонів). Планована роздільна здатність: 5 м (панхроматичний канал) і 10 м (мультиспектральний); полоса захвату: 60 км.

Однак розробка була припинена в травні 1994 року через недостатнє фінансування.

3.2.2. Збій пристрою Scan Line Corrector

31 травня 2003 року вийшов з ладу пристрій Scan Line Corrector (SLC) в інструменті ETM+. SLC складається з двох невеликих дзеркал, які обертаються разом з основним скануючим дзеркалом ETM+. Його призначення — компенсувати продовжувальний рух супутника, щоб отримувані смуги сканування були розташовані паралельно одна одній та перпендикулярно до напрямку руху супутника. Без цієї компенсації зображення набувають «зигзагоподібної» форми, коли деякі ділянки поверхні знімаються двічі, а деякі взагалі не знімаються. У разі відсутності корекції через SLC супутник передає приблизно на чверть менше даних.

Після аварії було створено групу Anomaly Response Team (ART), до складу якої увійшли представники USGS, NASA та компанії Hughes Santa Barbara Remote Sensing, виробника ETM+. Група надала список можливих причин поломки, більшість з яких вказувала на механічні проблеми самого SLC. Оскільки на борту не було резервного пристрою SLC, механічну проблему не можна було усунути. Проте група не виключала можливість електричної поломки. Тому 3 вересня 2003 року директор USGS Чарльз Г. Гроат дозволив проекту Landsat перенастроїти інструмент ETM+ та інші системи космічного апарата, щоб використовувати резервне електричне обладнання («Side-B»).

5 вересня 2003 року, після перенастройки, інструмент ETM+ було знову увімкнено, і він почав передавати дані до наземного центру Landsat в EROS, розташованому неподалік Сіу-Фоллса, Південна Дакота. Однак стало зрозуміло, що переключення на резервне електричне обладнання не виправило проблеми з SLC. Тоді інструмент було перенастроєно назад на основне електричне обладнання. Подальше заключення групи визнало механічні причини поломки та їх неустранимість.

Landsat-7 продовжив збір даних у подібному режимі. Деякі ГІС дозволяють користувачам заповнювати невідзняті ділянки зображення даними з інших витків Landsat-7 або шляхом інтерполяції. Для продовження програми Landsat до кінця 2010-х років має бути виведений в космос еквівалентний науковий датчик на новому супутнику.

Вимкнення SLC не вплинуло на радіометричну точність і на якість роботи фотодіодів.

3.3. ХМАРНІ СЕРВІСИ GOOGLE EARTH ENGINE

Google Earth Engine (GEE) — це революційна платформа для обробки та аналізу геопросторових даних, яка використовується для моніторингу і вивчення різних аспектів нашої планети. GEE об'єднує величезні обсяги супутникових зображень і геопросторових даних, надаючи користувачам потужні інструменти для виконання комплексних аналізів.

Основні Особливості Google Earth Engine

1. Обширна База Даних:

- Google Earth Engine містить доступ до понад 40 років супутникових знімків з різних джерел, таких як Landsat, Sentinel, MODIS, PlanetScope, а також численні векторні дані.

- Дані охоплюють широкий спектр тем, включаючи зміну земного покриття, гідрологію, кліматичні зміни, біорізноманіття і багато інших аспектів.

2. Хмарна Обробка:

- Обробка даних здійснюється на потужних серверах Google, що дозволяє швидко аналізувати великі обсяги інформації без потреби у значних локальних обчислювальних ресурсах.

- Це дозволяє уникнути проблем із обмеженнями пам'яті та швидкістю обробки, які можуть виникати при роботі з традиційними інструментами GIS.

3. Потужні Інструменти Аналізу:

- GEE надає доступ до різноманітних алгоритмів для геоаналізу, включаючи класифікацію зображень, обчислення індексів (наприклад, NDVI для

моніторингу вегетації), аналіз змін, просторове моделювання і статистичний аналіз.

- Користувачі можуть проводити детальний аналіз даних, використовуючи методи машинного навчання та штучного інтелекту.

4. Програмування та Автоматизація:

- Користувачі можуть писати код на JavaScript або Python для створення спеціалізованих алгоритмів аналізу, що дозволяє автоматизувати процеси збору та обробки даних.

- Можливість створення користувацьких скриптів дозволяє дослідникам реалізувати унікальні проекти та задачі, адаптуючи інструменти під свої потреби.

5. Інтерактивна Візуалізація:

- GEE дозволяє створювати інтерактивні карти та візуалізації результатів аналізу, що можуть бути вбудовані в веб-додатки або ділитися з іншими користувачами.

- Інтерактивні графіки та візуалізації допомагають краще зрозуміти та презентувати дані.

6. Гнучкість та Спільнота:

- Платформа постійно оновлюється та вдосконалюється, завдяки зворотному зв'язку від спільноти користувачів та розробників.

- Google Earth Engine має активну спільноту, що включає дослідників, екологів, студентів та професіоналів у різних галузях, які діляться своїм досвідом та ресурсами.

7. Застосування у Різних Сферах:

- GEE використовується в численних сферах, таких як:

- Екологічний моніторинг: спостереження за змінами в земному покритті, втратою лісів, деградацією ґрунтів тощо.

- Управління водними ресурсами: моніторинг якості води, визначення змін у водних ресурсах і управління водними ресурсами.

- Агровиробництво: аналіз вегетації, прогнозування врожайності та оптимізація агрономічних практик.
- Міське планування: аналіз міського розвитку, управління земельними ресурсами та планування інфраструктури.
- Кліматичні дослідження: оцінка впливу змін клімату, моніторинг екстремальних погодних явищ і природних катастроф.

8. Дослідження та Освіта:

- GEE активно використовується в академічних дослідженнях і навчальних програмах, дозволяючи студентам і дослідникам аналізувати реальні дані та отримувати практичні навички в обробці геопросторових даних.

3.4. АЛГОРИТМ КОНТРОЛЬОВАНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ CART

Використання бінарних дерев рішень для класифікації є непараметричним підходом до розпізнавання образів. Дерево рішень забезпечує ієрархічне представлення простору ознак, в якому x і вибірок розподілені по класах w_j ($j = 1, 2, \dots, k$) відповідно до результату, отриманого в результаті виконання рішень, прийнятих в послідовності вузлів, в яких гілки дерева розходяться. Тип дерева рішень, який використовується в даній роботі, докладно розглядається в роботі [42], чий внесок був узагальнений у CART (Classification And Regression Trees) Алгоритм.

Цей метод вказівки полягає в тому, що дерева можуть використовуватися не тільки для класифікації об'єктів на дискретне число груп, але і як альтернативний підхід до регресійного аналізу, при якому значення змінної відповіді (залежної) повинно оцінюватися з урахуванням значення кожної змінної в наборі пояснювальних (незалежних) змінних. Бінарні дерева рішень складаються з множинного поділу простору ознак на два підпростори, причому кінцеві вузли пов'язані з класами w_j . Бажане дерево рішень - це дерево, яке має відносно невелике число гілок, відносно невелике число проміжних вузлів, від

яких ці гілки розходяться, і високу передбачувану силу, при якій об'єкти правильно класифікуються в кінцевих вузлах.

CART передбачає виявлення та побудову бінарного дерева рішень на основі вибірки навчальних даних, для яких відома правильна класифікація. Число об'єктів в двох підгрупах, визначених на кожному двійковому розділі, що відповідають двом гілкам, що виходять з кожного проміжного вузла, послідовно зменшується, так що для отримання хороших результатів потрібна досить велика навчальна вибірка [43].

Дерево рішень починається з кореневого вузла t , що виходить з того, що змінна в просторі ознак мінімізує ступінь домішки двох пов'язаних вершин. Використовуючи визначення, наведене в [35], Міра домішки в вузлі t , що позначається $I(t)$, має вигляд, як показано в наступному рівнянні (1),

$$i(t) = - \sum_{j=1}^k p(w_j | t) \log p(w_j | t) \quad (1)$$

де $p(w_j | t)$ - частина візерунків x_i , віднесена до класу w_j по вершині t .

Потім кожна нетермінальна вершина розбивається на дві наступні вершини, t_L і t_R , так що $p_L, p_R \in$ частками сутностей, переданих новим вершинам t_L і t_R , відповідно. Найкращим поділом є той, який максимізує різницю, наведену в (2):

$$\Delta i(s, t) = i(t) - p_L i(t_L) - p_R i(t_R) \quad (2)$$

Дерево рішень росте шляхом послідовних поділів до тих пір, поки не буде досягнута стадія, на якій не відбувається значного зниження ступеня домішки з подальшим додатковим поділом. При досягненні цієї стадії вершина t не ділиться далі і автоматично стає кінцевою вершиною. Клас w_j , пов'язаний з кінцевим вузлом t , є класом, який максимізує умовну ймовірність $p(w_j | t)$.

3.4.1. Навчальні вибірки.

На основі векторних даних планів лісорозведення, отриманих у відповідь на запит Державного агентства лісів України, було відібрано та перевірено 46 ділянок класифікації, вкритих лісовою рослинністю, та перевірені на знімках

Landsat 7 станом на 2000 та 2020 роки. Для визначення нелісистих територій було підібрано 35 полігонів, які відповідають характерним поширеним ландшафтам Волинської області.

3.5. ОЦІНКА ТОЧНОСТІ

При здійсненні керованої класифікації виникає ряд помилок, обумовлених спектральною схожістю класів або помилками користувачів при визначенні областей класифікації. З цією метою була проведена оцінка точності класифікації земельного покриття для визначення та вимірювання значень похибки одержуваного зображення. Найбільш поширеним методом оцінки точності є обчислення матриці похибок [16], в якому отримані дані зображення порівнюються з контрольними даними для відповідної кількості одиниць класифікації. Відповідно, на основі отриманої матриці похибок загальна точність класифікації розраховується як відношення правильно класифікованих елементів до загальної кількості елементів вибірки.

Оцінка точності була використана для перевірки класифікації з використанням 30% контрольних точок, отриманих спочатку. Еталонне значення, що вводиться дослідником, ґрунтується на даних про надійність земельного покриття. У цій класифікації точність виробника (включає пропуски помилок, що стосуються ступеня спостережуваного аспекту на місцевості, яка не класифікована на карті) і точність користувача (оцінює пропуски помилок і пояснює можливість того, що піксель відноситься до категорії). Завдяки використанню даних Landsat 7 з просторовою роздільною здатністю 30 м, середня мінімальна площа, на яку можна зробити розрахунки, становить 0,337 га

Матриці похибок були розраховані для оцінки точності класів землекористування та земельного покриття. Існує чотири конкретні статистичні показники точності, а саме: загальна точність (OA), точність виробника (PA), точність користувача (UA) та κ , які були отримані для оцінки точності класифікації. Найбільш репрезентативними з них є сумарна точність (OA) і

коефіцієнт κ . Середня точність класифікації становить $OA_{av}=98,82\%$, $\kappa_{av}=0,9764$.

Оцінка точності для кожного року представлена на рис.3.1.

На рис. 3.2. відображено динаміку зміни площ втрат лісового покриву в межах досліджуваної території.

На рис 3.3. представлена карта, що побудована на композиті зображень з 2001 по 2021 роки на досліджувану територію, де відображено зміни лісового покриву в частині вирубок.

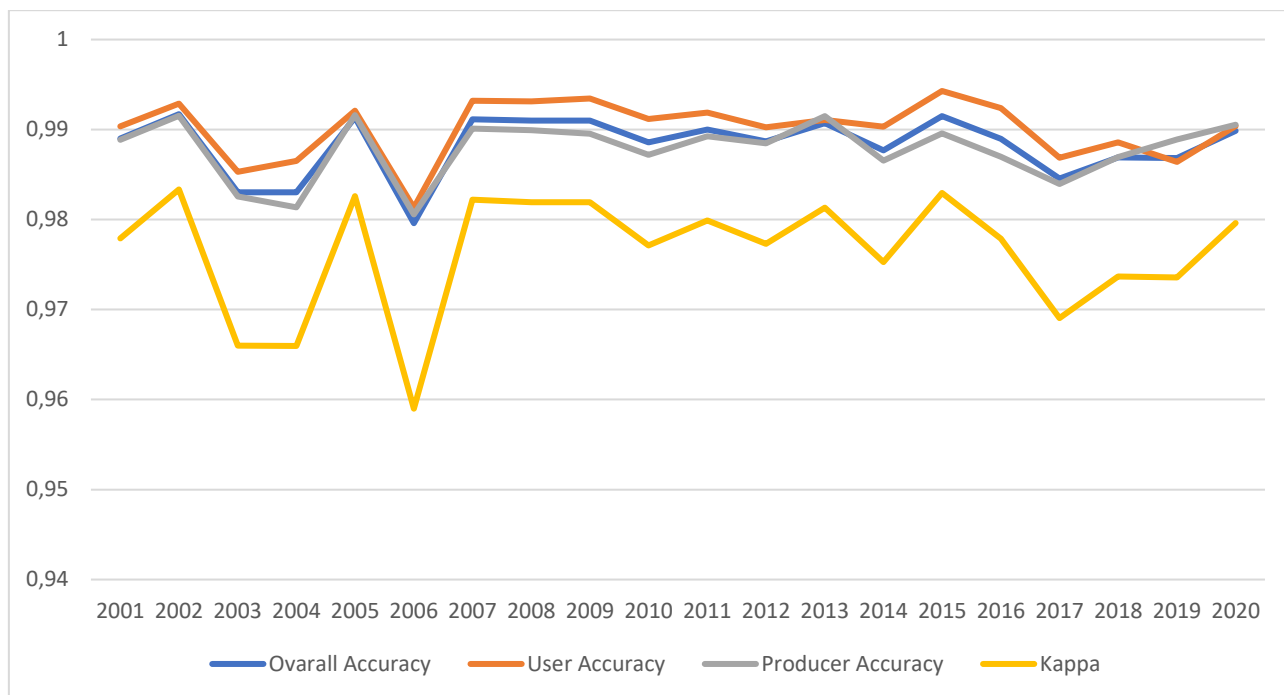


Рис. 3.1. Оцінка точності

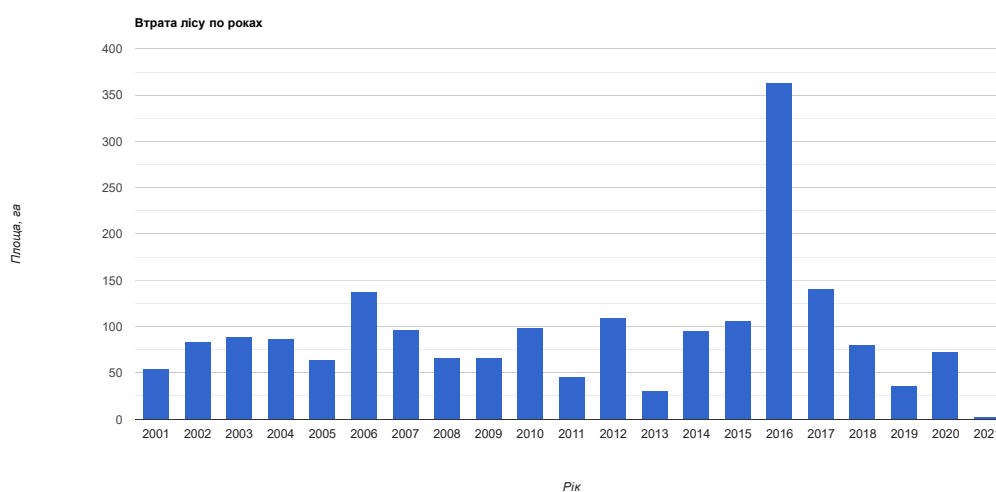


Рис. Динаміка зміни площ втрат лісового покриву

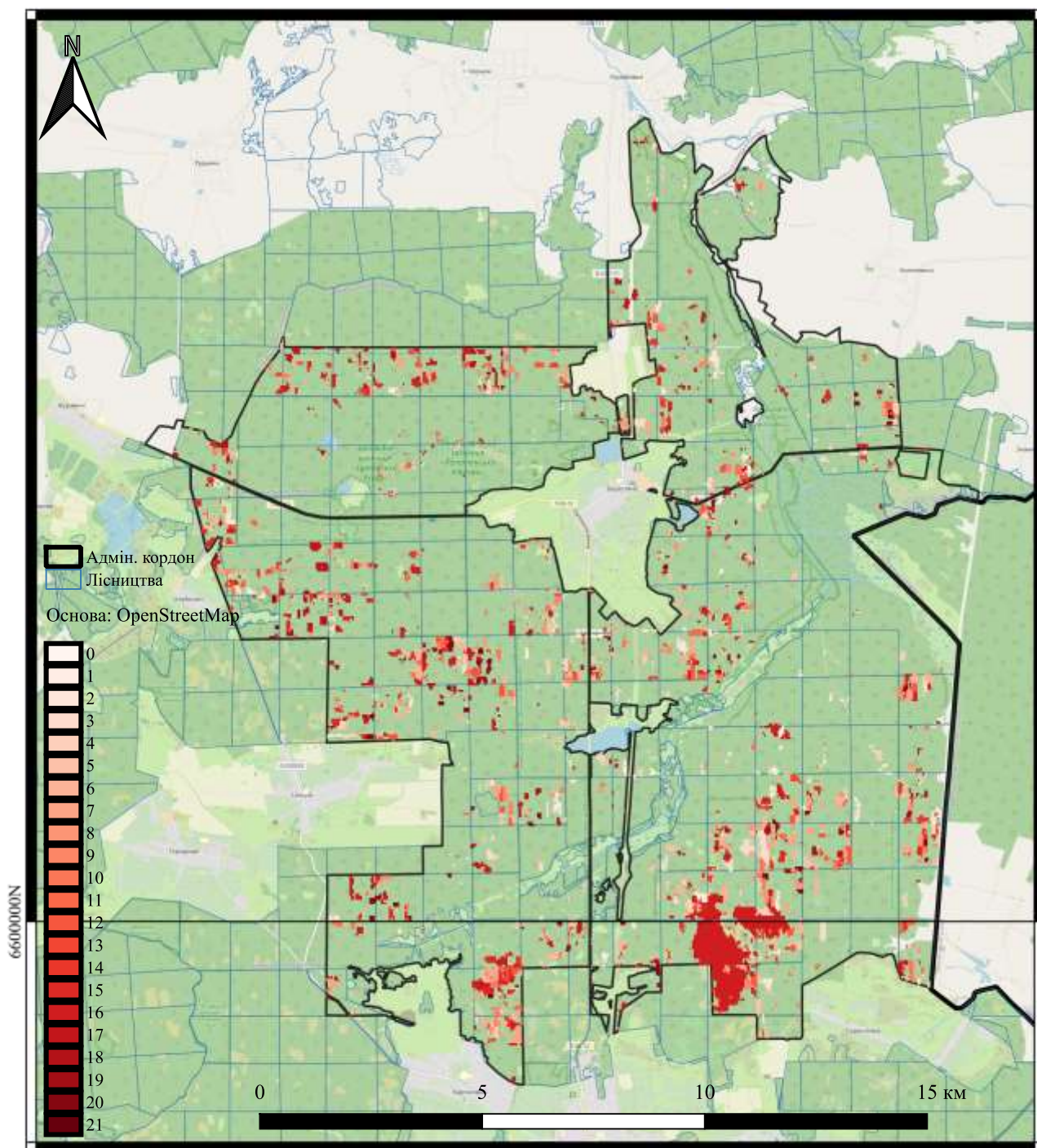


Рис. 3.3. Локалізація втрат лісового покриву в межах НПП Цуманська Пуща

Висновки

Застосування супутникових даних і технологій дистанційного зондування дозволяє ефективно моніторити зміни в лісових екосистемах, оцінювати обсяги лісових ресурсів, виявляти зміни у лісовому покриві та контролювати вплив людської діяльності. Такі дані слугують важливим інструментом для ухвалення рішень щодо управління лісами, збереження біорізноманіття та сталого розвитку.

Доступ до відкритих даних і веб-ресурсів, пов'язаних із космічним моніторингом лісів, забезпечує цінну інформацію для дослідників, науковців, державних органів, некомерційних організацій і широкої громадськості. Відкритий доступ до таких даних сприяє співпраці, обміну знаннями та спільним зусиллям щодо збереження лісових ресурсів.

У цілому, космічний моніторинг лісів та використання відкритих даних дистанційного зондування мають значний потенціал для захисту лісових екосистем та сталого управління ресурсами. Вони забезпечують об'єктивну інформацію про стан лісів і їхні зміни, що є ключовим для прийняття науково обґрунтованих управлінських рішень.

Google Earth Engine є незамінним інструментом для вчених, аналітиків і всіх, хто займається дослідженням земних систем. Його потужні можливості для обробки та аналізу даних відкривають нові горизонти в наукових дослідженнях і практичному застосуванні геоінформаційних технологій. Платформа сприяє усвідомленню проблем навколишнього середовища та підтримує сталий розвиток, надаючи доступ до важливих даних і інструментів для їх аналізу.

Список використаних джерел

1. ЛІСОГОСПОДАРСЬКА ДІЯЛЬНІСТЬ В УКРАЇНІ / FORESTRY ACTIVITIES IN UKRAINE Аналітичне дослідження / Analytical research. .
2. Загальна характеристика лісів України | Державне агентство лісових ресурсів України: URL: <https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisi-ukrayini/zagalna-harakteristika-lisiv-ukrayini>(дата звернення: 03.11.24).
3. Hildebrandt, G. TOY or TOOL—Fernerkundung aus dem Weltraum: Spiel- oder Werkzeug für die Forstwirtschaft? Forstwissenschaftliches Centralblatt. 1987. Vol. 106. C. 141–168.
4. Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., та ін. Current status of Landsat program, science, and applications. Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 225. C. 127–147.
5. Hansen, M. C., Potapov, P. V, Moore, R., та ін. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science (New York, N.Y.). 2013. Vol. 342, No. 6160. C. 850–853.
6. Fassnacht, F. E., White, J. C., Wulder, M. A., та ін. Remote sensing in forestry: current challenges, considerations and directions. An International Journal of Forest Research. 2024. Vol. 97. C. 11–37.
7. Grabska, E., Frantz, D., Ostapowicz, K. Evaluation of machine learning algorithms for forest stand species mapping using Sentinel-2 imagery and environmental data in the Polish Carpathians. Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 251. C. 112103.
8. Tomppo, E., Olsson, H., Ståhl, G., та ін. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112, No. 5. C. 1982–1999.
9. McRoberts, R. E. Probability- and model-based approaches to inference for proportion forest using satellite imagery as ancillary data. Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114, No. 5. C. 1017–1025.
10. Gregoire, T. G., Næsset, E., McRoberts, R. E., та ін. Statistical rigor in LiDAR-assisted estimation of aboveground forest biomass. Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 173. C. 98–108.
11. Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R. A., та ін. Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 156. C. 322–334.
12. Magnussen, S., Nord-Larsen, T., Riis-Nielsen, T. Lidar supported estimators of wood volume and aboveground biomass from the Danish national forest inventory (2012–2016). Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 211. C. 146–153.

13. Magnussen, S., Næsset, E., Gobakken, T. LiDAR-supported estimation of change in forest biomass with time-invariant regression models. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0084>. 2015. Vol. 45, No. 11. C. 1514–1523.
14. Coomes, D. A., Dalponte, M., Jucker, T., та ін. Area-based vs tree-centric approaches to mapping forest carbon in Southeast Asian forests from airborne laser scanning data. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 194. C. 77–88.
15. Dalponte, M., Ørka, H. O., Gobakken, T., та ін. Tree species classification in boreal forests with hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2013. Vol. 51, No. 5. C. 2632–2645.
16. Dalponte, M., Ørka, H. O., Ene, L. T., та ін. Tree crown delineation and tree species classification in boreal forests using hyperspectral and ALS data. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 140. C. 306–317.
17. Ørka, H. O., Hansen, E. H., Dalponte, M., та ін. Large-area inventory of species composition using airborne laser scanning and hyperspectral data. *Silva Fennica*. 2021. Vol. 55, No. 4.
18. Chen, J. M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 22, No. 3. C. 229–242.
19. Dandois, J. P., Ellis, E. C. Remote sensing of vegetation structure using computer vision. *Remote Sensing*. 2010. Vol. 2, No. 4. C. 1157–1176.
20. Dandois, J. P., Ellis, E. C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 136. C. 259–276.
21. Goodbody, T. R. H., Coops, N. C., Marshall, P. L., та ін. Unmanned aerial systems for precision forest inventory purposes: A review and case study. <https://doi.org/10.5558/tfc2017-012>. 2017. Vol. 93, No. 1. C. 71–81.
22. Corona, P., Fattorini, L. Area-based lidar-assisted estimation of forest standing volume. *Canadian Journal of Forest Research*. 2008. Vol. 38, No. 11. C. 2911–2916.
23. Colomina, I., Molina, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 92. C. 79–97.
24. Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C., та ін. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 34, No. 3. C. 573–583.
25. Leeuwen, M. van, Nieuwenhuis, M. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research*. 2010. Vol. 129, No. 4. C. 749–770.

26. Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K., та ін. Forest Inventory with Terrestrial LiDAR: A Comparison of Static and Hand-Held Mobile Laser Scanning. *Forests* 2016, Vol. 7, Page 127. 2016. Vol. 7, No. 6. C. 127.
27. Lovell, J. L., Jupp, D. L. B., Newnham, G. J., та ін. Measuring tree stem diameters using intensity profiles from ground-based scanning lidar from a fixed viewpoint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2011. Vol. 66, No. 1. C. 46–55.
28. Newnham, G. J., Armston, J. D., Calders, K., та ін. Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. *Current Forestry Reports*. 2015. Vol. 1, No. 4. C. 239–251.
29. Holopainen, M., Vastaranta, M., Rasinmäki, J., та ін. Uncertainty in timber assortment estimates predicted from forest inventory data. *European Journal of Forest Research*. 2010. Vol. 129, No. 6. C. 1131–1142.
30. Holopainen, M., Vastaranta, M., Hyypä, J. Outlook for the next generation's precision forestry in Finland. *Forests*. 2014. Vol. 5, No. 7. C. 1682–1694.
31. Gobakken, T., Næsset, E. Estimation of diameter and basal area distributions in coniferous forest by means of airborne laser scanner data. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 19, No. 6. C. 529–542.
32. Siipilehto, J., Lindeman, H., Vastaranta, M., та ін. Reliability of the predicted stand structure for clear-cut stands using optional methods: Airborne laser scanning-based methods, smartphone-based forest inventory application trestima and pre-harvest measurement tool EMO. *Silva Fennica*. 2016. Vol. 50, No. 3.
33. Popkin, G. Forest fight. *Science*. 2021. Vol. 374, No. 6572. C. 1184–1189.
34. Hermosilla, T., Bastyr, A., Coops, N. C., та ін. Mapping the presence and distribution of tree species in Canada's forested ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 2022. Vol. 282. C. 113276.
35. Nyström, M., Lindgren, N., Wallerman, J., та ін. Data Assimilation in Forest Inventory: First Empirical Results. *Forests* 2015, Vol. 6, Pages 4540-4557. 2015. Vol. 6, No. 12. C. 4540–4557.
36. White, J. C., Wulder, M. A., Hermosilla, T., та ін. A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 194. C. 303–321.
37. Stinson, G., Magnussen, S., Boudewyn, P., та ін. Canada. National Forest Inventories: Assessment of Wood Availability and Use. 2016. C. 233–247.
38. Forest Monitoring, Land Use & Deforestation Trends | Global Forest Watch: URL: <https://www.globalforestwatch.org/>(дата звернення: 03.11.24).
39. Melnyk, O., Manko, P., Brunn, A. Remote sensing methods for estimating tree species of forests in the Volyn region, Ukraine. *Frontiers in Forests and Global*

Change. 2023. Vol. 6.

40. Фесюк, В. О., Мороз, І. А., Федонюк, М. А., та ін. Методика та практична імплементація дослідження зміни лісистості Волинської області із використанням методів ДЗЗ. Вісник Харківського національного університету імені ВН Каразіна. Серія Геологія. Географія. Екологія. 2023. No. 58.

41. Uhl, A., Melnyk, O., Melnyk, Y., та ін. Remote sensing monitoring of changes in forest cover in the Volyn region: a cross section for the first two decades of the 21st century. Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series" Geology. Geography. Ecology". 2024. No. 60. С. 272–283.

42. Gordon, A. D., Breiman, L., Friedman, J. H., та ін. Classification and Regression Trees. Biometrics. 1984. Vol. 40, No. 3. С. 874.

43. McLachlan, J., G. Discriminant analysis and statistical pattern recognition. 1992.

44. Мельник, О. В., Манько, П. В. КЛАСИФІКАЦІЯ ЛІСОВИХ МАСИВІВ ВОЛИНИ ЗА ДАНИМИ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ. ScienceRise. 2018. Vol. 9. С. 25–30.

Додатки