

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»**

Інститут електроенергетики
(інститут)

Факультет інформаційних технологій
(факультет)

Кафедра інформаційних систем та технологій та комп'ютерної інженерії
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Бенецького Яна Яновича
(ПІБ)

академічної групи 126М-22-1
(шифр)

спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
(код і назва спеціальності)

за освітньо-професійною програмою 126 Інформаційні системи та технології
(офіційна назва)

на тему «Інформаційна технологія моделювання показників стану лісових насаджень за даними оптичної супутникової зйомки»
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтингово ю	інституційною	
кваліфікаційної роботи	доц. Сергєєва К.Л..			
розділів:				
Аналітична частина				
Розробка алгоритму				
Моделювання та дослідження методики				
Рецензент				
Нормоконтролер	проф. Коротенко Г.М.			

**Дніпро
2023**

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
інформаційних технологій
та комп'ютерної інженерії
(повна назва)

_____ Гнатушенко В.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

«_» _____ 202_ року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня магістр

студенту Бенецькому Я.Я.
(прізвище та ініціали)

академічної групи 126М-22-1
(шифр)

спеціальності _____ 126 «Інформаційні системи та технології»
за освітньо-професійною програмою 126 «Інформаційні системи та технології»

(офіційна назва)

на тему «Інформаційна технологія моделювання показників стану лісових насаджень за даними оптичної супутникової зйомки»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 09.10.2023 р.
№ 1227-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Розділ 1	Провести огляд сучасних підходів до оцінки лісових ресурсів	12.09.2023
Розділ 2	Огляд методів для дослідження стану лісових насаджень на оптичних знімках.	03.10.2023
Розділ 3	Розробка та тестування технології моделювання показників стану лісових насаджень за даними оптичної супутникової зйомки.	24.11.2023

Завдання видано _____
(підпис керівника)

доц. Сергєєва К.Л.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі 09 вересня 2023 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії

_____ р.

Прийнято до виконання _____
(підпис студента)

Бенецький Я.Я.
(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 64 с., 10 рис., 11 джерел, 1 додаток.

Об'єкт дослідження: супутникові знімки Sentinel-2 для моделювання показників стану лісових насаджень.

Предмет дослідження: технологія для моделювання показників стану лісових насаджень.

Мета кваліфікаційної роботи: розробка інформаційної технології для моделювання показників стану лісових насаджень.

Кваліфікаційна робота присвячена актуальній задачі розробки інформаційної технології для моделювання показників стану лісових насаджень на основі обробки та аналізу даних дистанційного зондування та геоінформаційних методів.

Наукове дослідження полягає у новому підході до аналізу лісових насаджень за допомогою часових рядів Sentinel-2. Використовуючи ці дані, було проведено глибоке вивчення впливу різних властивостей лісу та ділянки на відбивну здатність для трьох видів дерев. Такий підхід дозволяє докладно проаналізувати динаміку лісового середовища, розкриваючи тонкощі взаємодії між лісовими характеристиками та спектральним відображенням.

Практичне значення роботи для сфери лісового господарства та екології. Отримані дані вказують на складність відбивної здатності підставки та її варіацію в залежності від факторів, таких як висота та пора року. Це може бути використано для поліпшення методів моніторингу лісових ресурсів, дозволяючи точніше визначати стан лісів, їх зміни та потенційні проблеми.

Ключові слова: ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ (ДЗЗ), СУПУТНИКОВИЙ ЗНІМОК, ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ (ГІС), ЛІС, SENTINEL-2, ЧАСОВІ РЯДИ

ABSTRACT

The explanatory statement has 64 p., 10 figures, 11 sources, and 1 appendix.

Object of research: Sentinel-2 satellite images for modeling the state of forest plantations.

Subject of research: technology for modeling the state of forest plantations.

The purpose of the qualification work: development of information technology for modeling the state of forest plantations.

The qualification work is devoted to the urgent task of developing information technology for modeling the state of forest plantations based on the processing and analysis of remote sensing data and geographic information methods.

The research is a new approach to the analysis of forest plantations using Sentinel-2 time series. Using these data, an in-depth study of the impact of various forest and site properties on reflectance for three tree species was conducted. This approach allows us to analyze the dynamics of the forest environment in detail, revealing the subtleties of the interaction between forest characteristics and spectral reflectance.

Practical significance of the work for forestry and ecology. The data obtained indicate the complexity of the reflectivity of the stand and its variation depending on factors such as altitude and season. This can be used to improve forest monitoring methods, allowing for a more accurate determination of forest conditions, changes, and potential problems.

Keywords: REMOTE SENSING (RS), SATELLITE IMAGE, GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS), FOREST, SENTINEL-2, TIME SERIES

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	6
ВСТУП.....	7
1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ	8
1.1 Традиційні методи моніторингу лісів	8
1.2 Застосування ГІС технологій при здійсненні дослідження за лісовими ресурсами.....	10
1.3 Дешифрування космічних знімків - як джерело моніторингу за лісовими ресурсами.....	14
1.4 Висновки	25
2 ОГЛЯД МЕТОДІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ НА ОПТИЧНИХ ЗНІМКАХ.....	27
2.1 Аналіз проблеми дослідження.....	27
2.2 Фізичні характеристики падаючого випромінювання на основі оптичних даних.....	29
2.3 Методи для картографування лісового покриву.....	32
2.4 Методи класифікації лісового покриву	36
2.5 Методи дослідження стану лісових дерев.....	37
2.6 Висновки	40
3 ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ СТАНУ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ ЗА ДАНИМИ ОПТИЧНОЇ СУПУТНИКОВОЇ ЗЙОМКИ	41
3.1 Опис алгоритму технології	41
3.2 Область дослідження	47
3.3 Програмна реалізація технології	49
3.4 Тестування технології.....	50
3.5 Висновки	56
ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	59
ДОДАТОК А	61

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ГІС – геоінформаційні системи;

NOAA – Національне управління океанічних і атмосферних досліджень);

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer;

NIR – ближній інфрачервоний;

SWIR – короткий інфрачервоний.

ВСТУП

Ліси є джерелом важливих економічних ресурсів для розвитку суспільства. А головне вони забезпечують невід'ємні екосистемні послуги, необхідні для життя усього середовища, особливо для місцевих спільнот. Ліси мають величезне значення у формуванні місцевого клімату, збереженні чистої води, створенні життєвого середовища для дикої природи, виробленні кисню та поглинанні вуглецю. Вони також пропонують можливості для відпочинку та надають нелістяні продукти.

Пошкодження лісового покриву виникають від значних подій, таких як пожежі, напади шкідників, сильні вітри та експлуатація лісів. Найбільша загроза пошкодженню лісового покриву полягає в порушенні природної динаміки лісового середовища, порушенні складу порід, структури та функцій лісу. Це також може негативно вплинути на перерозподіл вуглецю між атмосферою та земною поверхнею: вуглець потрапляє в атмосферу через окислення та розкладання деревини, а лісове відновлення допомагає поглинати його з атмосфери. Тому оцінка пошкоджень лісів важлива не лише для визначення наявних ресурсів, а й для встановлення кількості вуглецю та інших складових лісу. Важливою стає можливість контролювати таку діяльність та передбачати її наслідки на рівні країни. Це набуває особливого значення в контексті управління лісовими ресурсами та планування екологічної політики. Розвиток аерокосмічної техніки і засобів дистанційного зондування надав можливість отримувати обширну інформацію щодо вулканічних процесів на Землі у вигляді матеріалів аерокосмічних зйомок. Ці дані вимагають оперативної обробки для ефективного контролю за станом потенційно небезпечних об'єктів. Тому вирішення проблеми створення єдиної системи моніторингу вулканічних зон є критичним для забезпечення безпеки населення. Це вимагає розробки теоретичних основ та створення класифікацій різних вулканічних явищ та методів їх виявлення за допомогою аерокосмічних засобів.

1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ

1.1 Традиційні методи моніторингу лісів

Моніторинг лісів є ключовим процесом, що включає систематичне спостереження за станом лісів. Він необхідний для ефективного господарювання лісовими ресурсами та збереження їх на майбутнє. Цей процес дозволяє виявляти зміни у лісовій екосистемі, визначати проблеми та розробляти стратегії для їх вирішення.

Традиційні методи моніторингу лісів відіграють важливу роль у визначенні розмірів лісових масивів, їх структури та складу порід. Це включає оцінку площі лісу, дослідження розподілу рослинного світу, виявлення вікових категорій дерев, визначення змін у біорізноманітті та інші аспекти, що дозволяють отримати повну картину стану лісів.

Сучасні технології, такі як супутникове зондування та дистанційне зондування, також використовуються для моніторингу лісів, дозволяючи отримувати більш детальну інформацію та швидше виявляти зміни в лісових екосистемах. Такий моніторинг є важливим елементом для сталого управління лісовими ресурсами та природоохоронних заходів.

Один із традиційних методів контролю за лісами - це облік лісових площ. Для цього використовуються аерофотознімки та картографічні матеріали, які допомагають визначати розміри лісових масивів та їх межі. Цей метод є цінним, оскільки дозволяє порівнювати дані про зміни площі лісів з плином часу.

Ще один традиційний метод - це таксація лісу. Цей процес полягає у визначенні параметрів лісових насаджень: віку дерев, їх складу, структури, густоти насаджень, діаметрів тощо. Лісокадастр допомагає розуміти, як змінюється структура лісу під впливом різних природних і антропогенних факторів. Цей метод надзвичайно важливий для збереження біорізноманіття та підтримки різноманітності екосистем.

Традиційні методи моніторингу лісів включають визначення різних показників, що описують стан лісу, таких як густина насаджень, висота дерев, розміри деревини, наявність хвороб і шкідників.

Ще один метод - це вибіркового районний облік, коли вимірюють параметри дерев і особливості лісового покриву на певній обмеженій території. Це дає можливість збирати докладні дані про структуру і функціонування лісових екосистем для подальшого аналізу і прогнозування їх стану.

Моніторинг стану лісів - це ще один важливий метод, який включає виявлення ознак хвороб і шкідників на деревах та визначення їх поширеності. Цей підхід дозволяє вчасно реагувати на поширення шкідливих організмів і запобігати масштабному ураженню лісу.

Збір і аналіз метеорологічних даних - важливий аспект традиційного моніторингу лісів. Це охоплює спостереження за температурою, опадами, вологістю та іншими метеорологічними параметрами. Ці дані допомагають встановити взаємозв'язок між кліматичними умовами та здоров'ям лісу.

Метеорологічні фактори, такі як температура, вологість, опади та інші, можуть впливати на здоров'я лісів. Наприклад, екстремальні погодні умови, довготривалі засухи або надмірні опади можуть стати стресовими для лісу, спричиняючи появу хвороб, зміни у складі видів та збільшення ризику виникнення пожеж.

Аналіз метеорологічних даних допомагає лісівникам та екологам розуміти, які впливи мають погодні умови на ліс, і приймати заходи для захисту лісових екосистем від негативних впливів клімату.

Хоча традиційні методи ефективні, вони мають свої обмеження, такі як великі затрати часу та ресурсів, а також обмежену точність зібраних даних. Тому для більш ефективного моніторингу лісів дедалі частіше використовують новітні технології, зокрема геоінформаційні системи, дистанційне зондування та аналіз за допомогою машинного навчання. Крім

цього, супутникові знімки стали популярними для оцінки стану лісів та виявлення змін у рослинному покриві на великих площах [1].

Отже, використання новітніх технологій спільно з традиційними методами може поліпшити ефективність моніторингу лісів та дати більш повний та точний образ їх стану.

1.2 Застосування ГІС технологій при здійсненні дослідження за лісовими ресурсами

Розподілення функцій ГІС можна поділити на п'ять груп, і перші три з них вважаються традиційними, тоді як останні дві - це нові, що розвинулися останнім десятиліттям.

1. Важливою функцією ГІС є створення і ведення баз даних з просторово-координованою інформацією. Серед таких баз можна виділити цифрові атласи, створені для різних країн, зокрема Цифровий атлас світу випущений фірмою Delorme Mapping Systems у 1986 році та Цифровий атлас Великобританії в рамках проекту Domesday (1987). Також до цих баз входить електронна версія Національного атласу України, розроблена Інститутом географії НАН України разом з фірмою "Інтелектуальні Системи Гео" у 2000 році.

Іншою важливою частиною таких баз даних є системи моніторингу, наприклад, Глобальний ресурсний інформаційний банк даних (GRID), створений під егідою UNESCO, або Геоінформаційна система країн Європейського Співтовариства CORINE.

Також до обов'язків ГІС належить створення та експлуатація кадастрових систем, які охоплюють різні галузі, включаючи автоматизовані земельні інформаційні системи (АЗІС), муніципальні автоматизовані інформаційні системи (МАІС) та просторово-розподілені автоматизовані інформаційні системи для кадастрів водних і лісових ресурсів, нерухомості тощо.

Програмне забезпечення для роботи з просторовими даними включає такі ГІС-пакети, як ARC/INFO, ArcView GIS, QGIS, MGE Intergraph, MapInfo (США), SICAD (Німеччина), ILWIS (Нідерланди) та інші. Ці платформи допомагають у зборі, обробці та візуалізації географічних даних для різноманітних цілей, включаючи управління кадастровою інформацією та аналіз природних ресурсів.

2. Функція автоматизованого картографування у ГІС включає створення якісних загальногеографічних і тематичних карт, що відповідають сучасним стандартам картографічної продукції. Один з прикладів реалізації цієї функції - діяльність Інституту передових технологій в Україні. Цей інститут використовує можливості ГІС-пакетів від фірми ESRI (США) для підготовки та друку навчальних географічних і історичних атласів для України.

ГІС дозволяють автоматизувати процес створення карт, забезпечуючи їхню високу якість, адаптовану до потреб користувача та сучасних стандартів картографії. Вони дозволяють включати різноманітні дані та ефективно їх візуалізувати, створюючи інформативні та зрозумілі картографічні продукти для різних цільових аудиторій.

3. Функція просторового аналізу і моделювання природних, природно-господарських та соціально-економічних територіальних систем спрямована на аналіз просторових відносин природних, природно-господарських та соціально-економічних територіальних систем. Вона базується на унікальних можливостях, що надають картографічна алгебра, геостатистика та мережний аналіз - ці інструменти складають основу аналітичних блоків сучасних ГІС і мають розвинуті аналітичні можливості.

Ця функція використовується як у наукових дослідженнях, так і в розв'язанні різноманітних практичних завдань у територіальному плануванні, проектуванні та управлінні. Вона дозволяє аналізувати різноманітні дані, враховуючи їх просторові взаємозв'язки, та розробляти моделі для передбачення та управління територіальними системами. Це включає аналіз

розподілу ресурсів, вивчення територій під впливом природних явищ чи людської діяльності, а також прогнозування можливих наслідків розвитку або змін.

4. Функція моделювання процесів у природних, природно-господарських і соціальноекономічних територіальних системах. Вона використовує сучасні просторово-розподілені моделі для різних процесів, таких як поверхневий стік, змив ґрунту, транспорт схилових і руслових відкладень, розподіл забруднень тощо. Прикладами таких моделей є LISEM, Csredis (Нідерланди), WEPP (США).

Використання цієї функції відбувається при оцінці та прогнозуванні поведінки природних і природно-господарських територіальних систем та їх компонентів. Вона допомагає розв'язувати різноманітні наукові та практичні завдання, зокрема у сфері охорони та раціонального використання природних ресурсів. Моделі, що використовуються, дозволяють проводити прогнози і оцінки впливу різних факторів на території, їхні взаємодії та можливі наслідки для довкілля та соціуму.

5. Функція підтримки прийняття рішень у сферах планування, проектування та управління базується на використанні систем, що надають можливість приймати обґрунтовані рішення. Україна, зокрема, вдало застосовує цей напрямок у містобудівному плануванні і управлінні надзвичайними ситуаціями. Ця функція включає такі складові:

1. Програмно-організовані банки даних: це сховища просторової та атрибутивної інформації.
2. База знань: включає блоки аналізу і моделювання. Сюди входять просторові та просторово-часові моделі, а також формалізована довідково-нормативна база даних з урахуванням проблеми.
3. Блок технологій штучного інтелекту: забезпечує розуміння і ухвалення рішень на основі наявних даних та результатів аналізу і моделювання.
4. Інтерфейс користувача: це зручний спосіб взаємодії з системою для користувачів.

У практиці, системи підтримки прийняття рішень можуть бути інтегрованими комп'ютерними системами, що включають програмні моделі, банки довідкової інформації та бази даних. Аналіз і оцінка результатів моделювання виконуються експертами поза системою [2, 3].

Сфери використання геоінформаційних систем (ГІС) на сьогодні вже охоплюють широкий спектр діяльності. До найбільш поширених галузей використання можна віднести:

1. Управління земельними ресурсами: включає земельні кадастри та моніторинг земель.
2. Інвентаризація та управління виробничою інфраструктурою: спостереження та контроль за об'єктами інфраструктури.
3. Тематичне картографування: застосування у різних галузях для створення карт.
4. Морська та аеронавігаційна картографія: для навігації в морі та повітрі.
5. Управління природними ресурсами: включає водні та лісові ресурси, дозволяючи ефективно керувати їх використанням.
6. Моделювання природних процесів: симулювання різних явищ для раціонального використання природних ресурсів та охорони навколишнього середовища.
7. Моніторинг стану навколишнього середовища: слідкування та аналіз змін у довкіллі.
8. Реагування на надзвичайні ситуації: допомагає при кризових ситуаціях та надзвичайних подіях.
9. Геологія та гірничодобувна промисловість: застосування у відновленні родовищ корисних копалин.
10. Містобудування та інженерні дослідження: використання для планування та будівництва.

Це лише частина сфер використання, оскільки ГІС застосовуються у багатьох галузях, таких як медична географія, епідеміологія, заповідна справа, туризм та багато інших, допомагаючи ефективно керувати і аналізувати різні аспекти людської діяльності.

Планування управління лісами вимагає аналізу та прогнозування можливих наслідків різних стратегій управління. Це включає оцінку того, як ліс буде виглядати та функціонувати в результаті впровадження різних методів управління. Здатність до такого аналізу має вирішальне значення для всіх, хто відповідає за прийняття стратегічних рішень, особливо у довгострокових планах щодо деревини та природних середовищ.

Прогнозування включає застосування стратегій управління через моделі до лісових кадастрів у ГІС та прогнозування результатів цих стратегій на майбутній ліс та інші пов'язані земельні об'єкти. Це означає, що інформаційні системи для лісового господарства мають здатність не лише описувати поточний стан лісу, але й працювати з динамікою розведення лісів та змінами великих ландшафтних зон як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі.

Сучасні ГІС надають можливість переглядати бази даних, встановлювати параметри моделей, спостерігати за результатами, додавати важливі параметри як часового, так і просторового характеру. Вони стають інструментом для вивчення різних сценаріїв та прийняття обґрунтованих рішень щодо керування лісовими ресурсами.

1.3 Дешифрування космічних знімків - як джерело моніторингу за лісовими ресурсами

Дешифрування та картографування породного складу та вікової структури лісів є ключовим напрямком використання космічних знімків у лісовому господарстві. Засоби спостереження з низьким (Terra/Aqua MODIS, SPOT-Vegetation) і середнім (Landsat) просторовим розділенням можуть бути

використані для створення різних картографічних продуктів, які дозволяють оцінювати лісовий покрив на конкретній території.

Ефективність дешифрування значною мірою залежить від сезону зйомки. Правильний вибір знімків з різних сезонів може забезпечити достовірні оцінки породного складу лісів. Наприклад, знімки, отримані в різні пори року, можуть показати відмінності у вегетації, що дозволяє більш точно визначати типи дерев і їхню структуру в лісі.

Такі дані дозволяють не лише створювати карти лісів, але і проводити аналіз впливу змін у природному середовищі на лісовий покрив та розвиток лісів в різний час.

Так, для дешифрування породного складу лісів за допомогою знімків різного спектрального діапазону, різні частини спектра носять важливе значення. У ближньому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні крони листяних дерев мають вищий коефіцієнт відбиття, ніж хвойних. Це створює відмінності в спектральних характеристиках, які допомагають розрізнити ці два типи лісів на зображеннях.

Також важливий Red Edge діапазон, що є перехідним між червоним та ближнім ІЧ. Цей діапазон може також надавати інформацію щодо різних порід лісу.

У видимому діапазоні спектра різниця у спектральній яскравості різних порід дерев влітній період є невеликою, але вона стає значно більш інформативною восінній період, коли відбуваються зміни в кольорі та характеристиках листя.

Отже, використання різних діапазонів спектра у залежності від сезону дозволяє отримати більш точні дані про склад лісів та їхні зміни впродовж року.

Використання синтезу каналів SWIR-NIR-RED для аналізу лісового покриву дійсно допомагає виділити різні типи лісів за їхніми спектральними характеристиками. Темнохвойні ліси зазвичай мають темно-зелений колір у

такому синтезі. Листяні ліси, натомість, виглядають яскраво-зеленими або салатовими.

Змішані ліси, де спостерігається суміш хвойних та листяних порід, можуть мати різні перехідні відтінки, особливо залежно від частки хвойних дерев та віку насадження. Наприклад, змішаний ліс з переважанням широколистяних порід, таких як липа, може мати жовтуватий відтінок у такому синтезі. Це може стати важливою характеристикою для розрізнення цього типу лісу від інших.

У синтезі каналів NIR-RED-GREEN на літньому знімку можна спостерігати різні відтінки для різних типів лісів. Темнохвойні ліси часто матимуть темно-червоний відтінок, дрібнолистяні ліси - яскраво-червоний, тоді як змішані ліси будуть мати перехідні кольори. Відокремити ялицево-липовий ліс від ялицево-березового лісу в цьому синтезі може бути важкою задачею.

Що стосується соснових лісів, їх можна виділити за вищою яскравістю в середньому ІЧ зоні спектра, а також у видимих каналах. Соснові ліси часто ростуть на піщаних ґрунтах, де рослинність менш розвинена. Це призводить до підвищення яскравості в середньому ІЧ і, в меншій мірі, у червоних діапазонах спектра. Такий спектральний відтінок у синтезі SWIR-NIR-RED може надавати сосновим лісам специфічний червонуватий колір, що допомагає відрізнити їх від темнохвойних лісів [3, 4].

в лісах головним чином формується спектральне зображення через крони дерев основного ярусу, і підріст у цьому процесі не має значного впливу. Щоб отримати інформацію щодо породного складу підросту, наприклад, про наявність ялини та ялиці під пологом мілколистяних порід, необхідно використовувати знімки різних сезонів. Особливо інформативними є знімки осіннього періоду, коли листя жовтіє і опадає. Дуже корисні також знімки зимового і весняного періодів. Ці знімки дозволяють виявити відновлення хвойних порід під пологом дрібнолистяних, таких як береза чи осика.

Проте варто відзначити, що у знімках осіннього та зимового періодів низький кут освітлення може вплинути на спектральні характеристики рослинності в залежності від їхнього розташування на схилі (північна або південна експозиція). Такі умови освітлення можуть призвести до різниці у спектральних характеристиках того самого типу рослин, які знаходяться на різних експозиціях схилу.

Осінні знімки надають багато додаткових можливостей для дешифрування складу лісів. У цей період можна використовувати RGB-синтез, що відображає натуральні кольори, для визначення видів деревини. На таких зображеннях ліси, де переважають береза, матимуть різні відтінки жовтого, тоді як ділянки з осикою часто матимуть помаранчевий відтінок, особливо у зв'язку з червонінням її листя в осінній період. Хвойні ліси зазвичай будуть виглядати темно-зеленими.

В синтезі каналів NIR-RED-GREEN, листяні ліси на осінніх знімках набувають світло-сірого відтінку через зменшення вмісту хлорофілу, що призводить до зниження коефіцієнта відображення в ближньому ІЧ каналі. У той же час, хвойні породи дерев залишають червоний відтінок.

Щодо змішаних лісів, осінні знімки дають можливість оцінити відсоток хвойних і листяних порід. Також можна відрізнити листяні породи за датою скидання листя: наприклад, липа скидає листя на кілька днів раніше, ніж деякі дрібнолисті породи, що дозволяє надійно розділити широколисті та дрібнолисті ліси.

Знімки, отримані в весняний період, можуть бути корисними для оцінки частки хвойних порід у насадженні, включаючи наявність або відсутність їх у підрослі. Також ці знімки дозволяють успішно визначати породний склад лісів, які відновлюються на занедбаних сільськогосподарських угіддях або на вирубках.

Хвойні дерева на знімках весняного періоду у синтезі NIR-RED-GREEN часто мають яскраво-червоний відтінок, залежний від зімкнутості крон, тоді як листяні породи частіше мають сірий або пісочний відтінок.

Листяні породи можуть виглядати приблизно однаково на цих знімках, оскільки їх характерні ознаки проявляються після початку вегетаційного періоду.

Найбільш ефективним для візуального або автоматизованого дешифрування є спільне використання декількох знімків, отриманих в різні сезони року.

Задача визначення віку насадження за космічними знімками є складною, і тут важливу роль відіграє текстура зображення. Старовікові темнохвойні ліси, які переважно складаються з ялини, ялиці та кедра, на знімках з просторовим дозволом 10-30 м можна часто виділити за характерною мілкопятнистою текстурою. В цих лісах часто можна помітити велику кількість сухостійних дерев та численні дрібні прогалини, що утворюються внаслідок вітровалів чи природного відпаду дерев. Вони створюють характерний малюнок зображення, де темніші ділянки відповідають кронам хвойних дерев, а світліші - галявинам.

Такі первинні ліси переважно поширені в особливо охоронюваних природних територіях, у важкодоступних гірських районах, на крутих схилах річкових долин і в водоохоронних зонах. Вони можуть мати характерні риси на знімках, що допомагає їх виділити серед інших типів лісів.

Первинні змішані ліси, такі як ялицево-березові, також мають деякі характерні дешифрувальні ознаки. Їх текстура часто відображається як мілкопятниста через велику кількість прогалин від падаючих дерев. Ці ліси ростуть на важкодоступних ділянках, нерідко в горах, ближче до верхньої межі лісу порівняно з первинними темнохвойними лісами.

Первинні соснові ліси зазвичай ростуть на важкодоступних заболочених місцевостях і мають гладку текстуру, характерну для боліт. Ці ліси, хоча вони можуть бути давніми, часто є низькими через непридатні умови для росту.

Спектральні ознаки переважаючих деревних порід для первинних і вторинних лісів в цілому можуть бути схожими. Вторинні ліси, які

відновлюються після вирубок на різних етапах сукцесії, також відрізняються в основному за текстурними ознаками. На знімках можна помітити сліди лісозаготівельної діяльності, такі як мережа просік, доріг для вивезення деревини та рубки лісу, навіть через кілька десятиліть після втручання в ліс.

Вторинні ліси мають свої відмінності від первинних. Наприклад, на вододільних ділянках частіше зустрічаються змішані і дрібнолистяні вторинні ліси, тоді як темнохвойні ліси можуть залишатися в зонах водоохорони. Вторинні ліси зазвичай мають більшу щільність дерев, менше сухостою та прогалин, що може впливати на їх текстурні особливості на зображеннях.

На важкодоступних територіях, де лісозаготівля обмежена, часто можна зустріти великі зони вторинних лісів, що відновлюються після пожеж чи вітрових руйнувань. Іноді, коли вирубки відсутні, контур зони, що зазнала пожежі чи була пошкоджена вітром, можна виявити ще й через 60-70 років, оскільки повне відновлення темнохвойного лісу займає понад 100 років. Космічний моніторинг лісових масивів є критичним для багатьох завдань, зокрема для оцінки змін у лісистості території, виявлення цінних ресурсів деревини в залишкових та перестійних зонах, аналізу процесів лісовідновлення на вирубках, а також для виявлення незаконної лісорубної діяльності та порушень у лісозаготівлі.

На космічних знімках середньої та високої роздільної здатності можна виявити рубки лісу, особливо якщо вони не великі або проводяться дискретно. Будь-яке порушення лісу, незалежно від його причини (чи то лісозаготівлі, чи природних факторів), має схожі спектральні ознаки. При частковому або повному видаленні деревного покриву спостерігається зниження відображення у ближній ІЧ зоні спектра (NIR), оскільки зменшується кількість хлорофілу. Зазвичай це супроводжується збільшенням відображення у середній ІЧ зоні (SWIR), через відкритий ґрунт, який відбиває більше сонячної радіації. Також на місцях рубок помітне збільшення відбиття у видимій зоні спектра, особливо в червоному каналі,

через те, що відкритий ґрунт відображає більше сонячного світла, ніж крони дерев.

Дешифрування вирубок на знімках, отриманих під час вегетаційного періоду, найчастіше використовує інформацію з середнього ІЧ діапазону (SWIR), а також синтез SWIR-NIR-RED. Проте, не всі супутникові системи здатні отримувати знімки у цьому спектральному діапазоні, або мають обмежену просторову роздільну здатність.

Дешифрування вирубок на знімках під час снігового покриву найбільш ефективно завдяки контрасту між лісовою рослинністю та сніговими ділянками. Для цього періоду найінформативніші канали видимого діапазону, адже забарвлення снігу та рослин забезпечує високий рівень контрастності.

Узагальнюючи, дешифрування рубок на зимових знімках, особливо під час початку весни, вважається більш ефективним, оскільки в цей час стояння Сонця є високим і це сприяє поліпшенню яскравості та контрасту на знімках [2, 4].

Дешифрування суцільних рубок у лісовому господарстві відносно просте завдяки сильному контрасту між вирубаними ділянками та незрубаними лісами. Зазвичай, у синтезі каналів NIR-RED-GREEN свіжі суцільні вирубки відображаються блакитно-зеленим відтінком, а в синтезі SWIR-NIR-RED - яскраво-рожевим. Це сприяє відокремленню їх від заростаючих вирубок, які мають яскраво-зелений колір у синтезі каналів SWIR-NIR-RED, через відновлення рослинного покриву.

Геометричні ознаки також грають важливу роль у виявленні вирубок. Прямі кути, особливо прямокутна форма, є характерними для суцільних вирубок, порівняно з іншими типами рубок. На ділянках інтенсивної лісозаготівлі зазвичай розташовані свіжі вирубки та заростаючі ділянки лісу, які організовані в шаховий порядок. Це стосується термінів примикання, які забороняють проведення рубок біля суцільних вирубок. Збереження цих термінів важливе для відновлення лісу та збереження ґрунтового покриву.

Однак для виявлення прохідних і особливо вибіркових рубок, які можуть бути менш видимими на знімках, потрібні зображення з вищою просторовою роздільною здатністю, наприклад, від 5 м або ще деталізовані. Такі дані надають змогу виявити менш очевидні типи рубок і допомагають визначити їхній характер на зображеннях з більшою точністю.

Використання різних спектральних каналів у вирішенні завдань лісового господарства є дуже важливим. Кожен канал несе свою унікальну інформацію, що допомагає в аналізі різних аспектів стану лісу.

Наприклад, композити зеленого і червоного каналів дозволяють отримувати якісні кольорові зображення, які використовуються в геоінформаційних системах. Додавання синього каналу полегшує виявлення лісових пожеж на безхмарних знімках, оскільки здорова рослинність поглинає більше променів у синій і червоній зонах, відображаючи зелений колір.

Зелений канал, крім формування композитного RGB-зображення, використовується для класифікації рослинності у поєднанні з іншими спектральними каналами. Він також є невід'ємним елементом у визначенні загального стану лісу. Врахування цих спектральних характеристик дозволяє здійснювати комплексний аналіз стану лісових масивів для ефективного лісового господарства [4].

Червоний канал у спектрі є дуже значущим для аналізу рослинності, особливо лісів. Саме тут спостерігається пік поглинання світла фотосинтезуючими рослинами, що робить цей канал дуже важливим для визначення змін у лісовому покриві. Він використовується для різноманітних завдань, таких як картографування збитку від стихійних лих, класифікація видів рослинності, моніторинг стану лісового покриву, оцінка запасів деревини, життєздатності лісу та визначення місцезнаходження доріг і просік.

Також крайній червоний канал використовується у поєднанні з ближнім інфрачервоним каналом для розрахунку індексу NDVI RE (NIR-RE)

/ (NIR + RE)]. Цей індекс особливо чутливий до змін у змісті хлорофілу рослин. Недавні дослідження показали, що через цей індекс можна точно визначити зниження вмісту хлорофілу в листі лісового покриву на ранніх стадіях, що може вказувати на передчасне старіння або навіть загибель дерев. Такий аналіз може бути корисним для попередження втрат у лісових масивах та вчасного втручання для збереження їх життєздатності [3].

Інфрачервоне випромінювання відображається здоровою рослинністю, і це невидимий для людського ока спектр, який має велику значущість для оцінки стану лісу. Через велику площу поверхні листя, здорова рослинність значно відбиває це випромінювання. Якщо ліс стикається з нападом комах, що шкодять листю, зниження випромінювання в цьому інфрачервоному діапазоні може свідчити про втрату листя та можливі проблеми.

Різні види рослин мають різну відображальну здатність у цьому спектрі. Хвойні породи, наприклад, мають меншу відображальну здатність порівняно з лиственими деревами. Показники відображення інфрачервоного випромінювання можуть вказувати на стан молодого порівняно зі старим лісом хвойних порід. Це робить канал NIR дуже важливим для класифікації лісів, визначення їх складу, а також моніторингу зараження комахами-шкідниками.

Крім того, канал NIR має ключове значення при вивченні наслідків ураганного вітру та при розрахунку різних біофізичних параметрів рослинності. Це дозволяє визначати важливі параметри стану лісового покриву та реагувати на потенційні проблеми у лісовій екосистемі.

Задачі лісового господарства, які вирішуються за допомогою космічного моніторингу, можна розділити на кілька напрямків:

Задачі інвентаризації та моніторингу лісового фонду:

- визначення породного складу лісів: це означає ідентифікацію видів дерев у лісі та їхніх площ, виявлення преобладаючих видів та їх розміщення на карті;

- категоризація лісів за різними параметрами: це включає в себе класифікацію лісів за віком дерев, ступенем їх зрілості, обсягом деревини, а також їхньою біологічною продуктивністю;
- визначення висоти лісових масивів: використання цифрових моделей місцевості, отриманих з космічних знімків, для оцінки висоти лісових масивів;
- картографування лісового фонду: створення карт, які відображають різноманітні параметри лісу, такі як його структура, густина, стан і обсяги.

Ці завдання дозволяють не тільки отримувати повні інформаційні описи лісів, але і створювати цінні карти для подальшого використання у плануванні лісгосподарських заходів та природоохоронних програмах.

Задачі моніторингу ведення лісокористування:

- контроль лісовідновлювальних робіт: включає в себе відстеження та оцінку процесів відновлення лісу після рубок, виявлення проблем у відновленні та вжиття заходів для поліпшення ситуації;
- експрес-оцінка фактичних площ рубок: автоматизована оцінка розміру та місцезнаходження нових рубок для забезпечення контролю та збору даних щодо змін у лісових покривах;
- вивчення природних умов: аналіз змін на лісових територіях, таких як болотисті ділянки, улоговини, особливості рельєфу тощо, щоб зрозуміти, як ці умови впливають на лісові масиви;
- контроль видів рубок та інфраструктури: моніторинг і контроль за різними видами рубок (вибіркових, поступових, суцільних), відстеження місцезнаходження доріг, волоків та майданчиків, що відповідають технологічним картам лісосіки для оптимального використання лісових ресурсів.

Ці задачі спрямовані на ефективний контроль за використанням лісових ресурсів та збереженням екосистем на лісових територіях.

Задачі охорони лісу і виявлення незаконних рубок:

- виявлення незаконних дій: моніторинг і виявлення існуючих незаконних вирубок, пожеж і інших порушень на лісових територіях. Оперативне відстеження нових ділянок, які можуть бути пошкоджені в результаті незаконних рубок або пожеж;
- оцінка збитків: визначення економічного та екологічного збитку, який виник внаслідок незаконних дій, включаючи вирубки і пожежі. Це допомагає у встановленні масштабів збитків і розробці заходів для їх усунення;
- моніторинг дотримання правил: забезпечення постійного контролю за лісозаготівельними компаніями, щоб переконатися, що вони дотримуються усіх встановлених правил і вимог щодо рубок та використання лісових ресурсів.

Ці завдання сприяють збереженню лісового фонду, зменшенню негативного впливу на екосистему та запобіганню незаконній експлуатації лісів.

Задачі боротьби з лісовими пожежами включають такі аспекти:

- оперативне виявлення та моніторинг пожеж: системи виявлення вогнищ лісових і торф'яних пожеж, включаючи високоточні супутникові системи, що дозволяють оперативно виявляти пожежні вогнища;
- прогнозування розвитку пожеж: аналіз метеорологічних умов та пірогенних факторів для прогнозування напрямку та швидкості розповсюдження вогню;
- оцінка збитків: визначення площі, яку пройшла пожежа, оцінка екологічного та економічного збитку для лісового господарства;
- виявлення гарей та їх моніторинг: використання автоматизованих систем для виявлення і визначення площі вже існуючих гарей та оперативний моніторинг появи нових ділянок, де сталося загоряння;

- оперативне виявлення осередків пожеж: використання алгоритмів для точного визначення невеликих осередків пожеж, що можуть швидко розповсюджуватися.

Ці завдання спрямовані на оперативне реагування на пожежі, зменшення їх наслідків та мінімізацію збитків для лісового фонду та екосистеми в цілому.

Завдання лісопатологічного моніторингу та виявлення впливу негативних погодних явищ на лісові масиви включають:

- вивчення негативних процесів: аналіз впливу шкідників, хвороб, пересушення або перезволоження лісів, що можуть викликати деградацію та загибель дерев;
- оцінка стану лісових насаджень: аналіз стану лісових масивів, що мають хронічне ослаблення через зараження хворобами, промислові викиди, надмірне використання для рекреаційних цілей тощо;
- виявлення ураганних пошкоджень: визначення масивів, які були частково чи повністю знищені ураганними вітрами, оцінка площі відновлення лісу після ураганів або визначення площ вітровалів;
- оцінка пошкоджених лісів: визначення та оцінка площі пошкоджених лісів внаслідок негативних погодних явищ для подальшого аналізу та планування відновлення.

Ці завдання допомагають вчасно реагувати на негативні процеси та втручатися для збереження та відновлення лісових екосистем.

1.4 Висновки

Вивчення та аналіз змін на лісових територіях стає ключовим для оцінки збереження природних ресурсів, визначення ступеня деградації та впливу на біорізноманіття. У зв'язку зі зростанням екологічних проблем, таких як зміна клімату, актуальна інформація про стан лісових екосистем

стає важливою для ефективних стратегій збереження та управління цими екосистемами.

Геоінформаційний аналіз та дані дистанційного зондування надають докладну інформацію про динаміку лісових площ: їх розташування, розміри, види лісів та зміни в часі. Це дозволяє виявляти причини змін, такі як рубки, приріст, розширення сільськогосподарських угідь, будівництво та інші антропогенні впливи. Постійне удосконалення технологій дозволяє розробляти нові методи обліку лісів, які знаходять своє використання у різних аспектах природокористування.

2 ОГЛЯД МЕТОДІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ НА ОПТИЧНИХ ЗНІМКАХ

2.1 Аналіз проблеми дослідження

У багатьох країнах, що розвиваються, чисельність населення і навантаження на землю постійно зростають, а існуючі системи землекористування не є сталими, оскільки вони сприяють виникненню проблем деградації земель. Враховуючи постійне зростання чисельності населення в країнах, що розвиваються, зростає нагальна потреба у найбільш раціональному поєднанні типів земель і землекористування, щоб максимально збільшити стале виробництво і задовольнити різноманітні потреби суспільства, зберігаючи при цьому крихку екосистему [5].

В даний час лісове виробництво в гірській місцевості польських Карпат стикається з проблемою посягань на лісові ресурси задля забезпечення дровами та перетворення лісових земель на сільськогосподарські угіддя. Межі між різними лісовими ресурсами, лісовими землями та сільськогосподарськими угіддями не є чіткими.

Розвиток лісогосподарського виробництва означає, що воно має високий потенціал для подолання бідності, розвитку сільських територій та покращення стану довкілля. Однак індустріалізація, зловживання та надмірна експлуатація, а також неналежне лісогосподарське землекористування посилили деградацію земельних ресурсів. Деградація лісових ресурсів є основною загрозою, яка впливає на існування та життєдіяльність громади. Сама земля та її ґрунти є важливою передумовою для вирощування лісу та подальшого виробництва деревини. Ґрунт є природним ресурсом і водночас важливим середовищем, що сприяє зростанню і розвитку лісів та їхньої рослинності. Розширення лісових насаджень на непридатних землях все більше зростає на більшій частині нагір'я і має негативний вплив на лісові ресурси провінції. З іншого боку, бракує детальної інформації про лісове

господарство, особливо щодо потенціалу лісів та лісових земель для належного лісокористування. Більше того, оцінка потенціалу земель для всіх видів використання була зроблена дуже мало, а оцінка потенціалу земель не враховує сучасну практику лісогосподарського землекористування.

З цих проблем очевидно, що планування лісогосподарського землекористування має бути адаптоване. Перш ніж приймати раціональні рішення, необхідно провести ретельний аналіз потенціалу землі та обмежень для альтернативних варіантів ведення лісового господарства. Для того, щоб мінімізувати ризики лісогосподарського виробництва та використовувати земельні ресурси лісогосподарського призначення у сталий спосіб, необхідно створити базу даних та оновлювати інформацію, особливо для оцінки потенційної продуктивності землі та її придатності для ведення лісового господарства. Оцінка потенційної продуктивності земель лісогосподарського призначення також необхідна для того, щоб допомогти планувальнику в ефективному плануванні землекористування. Раціональне землекористування на лісових землях не лише забезпечить знаннями для озеленення неродючих земель та захисту довкілля, але й для економічного розвитку з метою підвищення потенціалу лісових земель. Більше того, знання про потенціал доходу є нагальною умовою для належного землекористування та охорони земель у майбутньому. Оцінка придатності земель стосується процесу оцінки потенціалу землі для альтернативних видів землекористування [6]. Придатність земель оцінюється на основі ґрунту, топографії, рослинного покриву та взаємозв'язку між ґрунтом, рельєфом і рослинністю [7]. Однак, декілька змінних, інтегрованих в одну оцінку, не можуть дати точних і ефективних результатів, якщо не використовується ГІС. Географічні інформаційні системи (ГІС) є потужним інструментом для збору, зберігання, пошуку, перетворення і відображення просторових даних реального світу [8]. ГІС-системи були широко визнані як найбільш перспективний інструмент, здатний забезпечити надійну інформацію як для

планування, так і для прийняття рішень. Таким чином, ГІС знайшли широке застосування в оцінці земельного потенціалу.

В даній роботі аналіз проводився для насаджень з переважанням бука, ялиці та сосни звичайної в гірській місцевості польських Карпат. Вплив насаджень і властивостей ділянки на відбивну здатність у різні частини вегетаційного періоду було зафіксовано за допомогою щільних часових рядів, наданих Sentinel-2 за 2015–2019 роки.

2.2 Фізичні характеристики падаючого випромінювання на основі оптичних даних

Більша частина сонячного випромінювання припадає на діапазон від 200 до 2500 нм (рис. 2.1) з піком приблизно на 500 нм, відповідно до закону Планка, що наближає спектр випромінювання чорного тіла при 5800°К. В атмосфері світло розсіюється пилом, атмосферними молекулами та аерозолями та поглинається різноманітними газами на різних довжинах хвиль. Падаюча ультрафіолетова енергія, особливо в області 200–400 нм, поглинається O_2 та O_3 , тоді як у видимій частині спектру (400–700 нм) атмосфера стає прозорою.

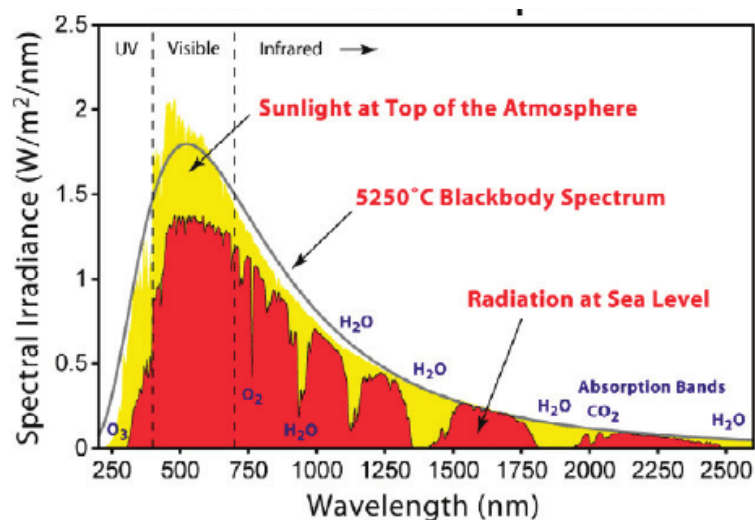


Рисунок 2.1 – Спектр сонячного випромінювання над і під атмосферою

Домінуючим поглиначем в області нирів (NIR) є вода (H_2O), яка має сильні характеристики поглинання при 1450, 1950 та 2500 нм, та слабкі характеристики при 980 та 1150 нм. Незначні особливості поглинання в NIR обумовлені CO_2 , O_2 , N_2O та CH_4 . З огляду на вплив атмосферних перешкод, застосування авіаційних та супутникових датчиків для оцінки відбиття рослинності (рис. 2.2) потребує урахування атмосферних умов, використовуючи моделі, які враховують атмосферний склад та передачу радіації [7, 10].

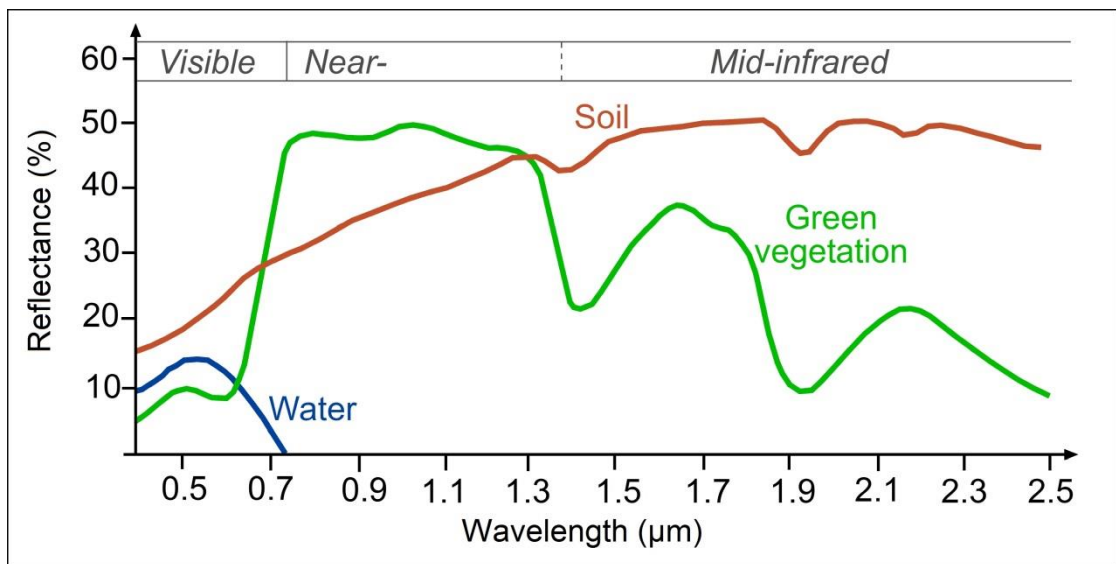


Рисунок 2.2 – Типові спектри відбиття

Енергія світла зменшується від коротшої до довшої довжини хвиль. Приблизно половина падаючої енергії, що досягає поверхні Землі, припадає на видиму область (400–700 нм), а інша половина — на ближню та середню інфрачервону область. Це значущо впливає на взаємодію сонячного світла з рослинами, що вибирають пігменти для поглинання вузких та більш енергетичних довжин хвиль, необхідних для фотохімічних реакцій фотосинтезу.

Взаємодія між падаючим випромінюванням і рослинами є надзвичайно складною через різноманіття розміру, форми, складу та розташування клітин, листя, стебла та рослин в екосистемах. Проте біофізичну основу майже всіх таких взаємодій можна згрупувати в одну з двох категорій: поглинання та розсіювання, причому розсіювання далі підрозділяється на відбиття та пропускання. Поглинання включає світло, що поглинається пігментами, рідкою водою та рядом інших рослинних компонентів. Оскільки специфічні особливості поглинання викликані або змінами енергетичних станів електронів, або змінами коливальних або обертальних властивостей молекул, особливості поглинання для окремих рослинних сполук мають тенденцію відбуватися в окремих частинах спектру, а не розподілятися в більш широкому діапазоні довжин хвиль.

Навпаки, розсіювання відбувається кожного разу, коли сонячне випромінювання будь-якої довжини хвилі перетинає межу між двома речовинами, що відрізняються за показником заломлення. Різниця між показниками заломлення повітря (1,0) і рідкої води (1,33) викликає добре відому ілюзію згинання палички при зануренні в басейн. Ранні дослідження з використанням сільськогосподарських культур оцінювали показник заломлення клітинних стінок у листі шляхом заміни міжклітинних повітряних просторів різними рідинами. Показник заломлення речовини, що мінімізує розсіювання та відбивання, вважався рівним показнику клітин. Значення, отримані за допомогою цього методу, варіювалися від 1,4 до 1,5 залежно від ступеня гідратації листя, при цьому нижчі значення надходили від добре зволоженого листя.

Хоча важко визначити точну кількість, загальний ступінь розсіювання в листках є функцією кількості та розташування клітинних і міжклітинних поверхонь, які заломлюють світло. Завдяки достатньо великій кількості заломлюючих поверхонь властивості спрямованості світла всередині листа стають ефективно однорідними. Для фотосинтетично активних довжин хвиль

це має ефект максимального поглинання пігментами та підвищення загальної швидкості фіксації CO₂. Для довжин хвиль ближнього інфрачервоного випромінювання, де поглинання компонентами листа або невелике або взагалі відсутнє, розсіювання збільшує ймовірність того, що фотони вийдуть із листка в напрямки дуже відрізняються від напрямку входу. Це забезпечує біофізичну основу для високого рівня відбиття листа в NIR-області.

2.3 Методи для картографування лісового покриву

Дистанційне зондування є потужним інструментом, який може бути використаний для вирішення проблеми тематичних карт, які застаріли і потребують оновлення. Можливості дистанційного зондування для картографування та отримання інформації про земні ресурси для різних застосувань добре задокументовані. Серед тих, що широко використовуються, є картографування земного покриву, яке вважається одним з найважливіших, найбільш прямих і добре відомих застосувань дистанційного зондування [10,11].

Картографування лісових ресурсів за допомогою *segenybrjdb* [*rysvrsd*] почалося в першій половині двадцятого століття з локального картографування лісів за даними аерофотозйомки. Картування ґрунтового покриву є продуктом розвитку дистанційного зондування, спочатку за допомогою аерофотозйомки [7]. Це пов'язано з тим, що для отримання інформації про земний покрив необхідний багаторазовий "перегляд" великих територій. З цієї ж причини картографування земного покриву було, мабуть, найбільш широко досліджуваною проблемою з використанням супутникових даних, починаючи з липня 1972 року, коли був запущений перший супутниковий датчик для моніторингу ресурсів Землі - Landsat 1. Технологія дистанційного зондування досягла значного прогресу, що дозволило картографувати лісові ресурси на значно більших площах завдяки використанню космічних датчиків. Landsat 2-5 надав більше даних про лісові

ресурси, ніж будь-коли може бути проаналізовано. Програма є настільки успішною, що вона продовжується навіть сьогодні, і планується запуск Landsat 7.

Супутникові данні вже багато років використовується для дослідження рослинності з різними цілями, такими як картування лісових пожеж, рослинного покриву та виявлення змін у рослинності протягом різних періодів [6]. Використання дистанційного зондування для картографування рослинності є широко застосовуваним методом в екологічних дослідженнях, оскільки воно дозволяє швидко визначити формування, розподіл і зміни рослинності на дуже великих територіях. Крім того, він дає можливість екстраполювати результати картографування на регіональний рівень, особливо на великі важкодоступні території [5].

Незважаючи на різні типи даних дистанційного зондування, які застосовуються для створення карт лісів і земного покриву з 1972 року, жоден вид супутникового дистанційного зондування наразі не відповідає повною мірою вимогам комплексної системи оцінки лісових ресурсів [11]. Було проведено численні дослідження щодо взаємозв'язку структури та видового складу лісів з геологічних і топографічних особливостей [9]. Кореляції деревних порід з екологічними змінними використовуються для отримання інформації про розподіл рослинності в різних масштабах. Крім того, важливо включати атрибути рельєфу (наприклад, схил, висота, місцевий рельєф) у статистичні правила прийняття рішень для класифікації екологічних одиниць з використанням даних дистанційного зондування. Згідно з [7] "Супутникове дистанційне зондування може використовуватися для надання інформації про лісові ресурси на трьох рівнях:

- просторова протяжність лісового покриву, яка може бути використана для оцінки просторової динаміки лісового покриву;
- тип лісу;
- біофізичні та біохімічні властивості лісів.

Супутникові дані низької роздільної здатності, такі як зображення NOAA (Національне управління океанічних і атмосферних досліджень), AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), часто використовуються для створення карт лісів на великих площах у регіональному та глобальному масштабах. Це широко використовується для екологічних програм на регіональному та глобальному рівнях. Були створені перші супутникові глобальні карти земного покриву. Зображення AVHRR також широко використовуються для оцінки площі та біофізичних властивостей лісів. Тому дані дистанційного зондування з грубою просторовою роздільною здатністю є найбільш корисними для виділення лісового покриву на великих площах. Однак існує одна основна проблема: невеликі ділянки можуть бути не виявлені, що призводить до неправильної оцінки залишків лісу, а це ускладнює спостереження за локальними деталями.

Зображення середньої просторової роздільної здатності, такі як Spot HRV і Landsat MSS/TM, успішно використовуються для картографування і моніторингу лісів. Піонерські дослідження проілюстрували потенціал цих оптичних супутникових даних для відокремлення лісового покриву від нелісового, як, наприклад, дані Landsat і Spot для оцінки лісового покриву на місцевому і національному рівнях. Середні оптичні знімки Spot і Landsat також використовуються для оцінки біологічних і біохімічних властивостей тропічних лісів, таких як індекс листової поверхні (LAI), біомаса або наметове покриття.

Оптичне дистанційне зондування широко використовується для картографування площі лісів, а також часової і просторової динаміки вирубки, відновлення лісів і пожеж. Переваги використання даних Landsat і Spot у їхньому дослідженні панхроматичного тропічного дистанційного зондування, згадані в Оцінці лісових ресурсів ФАО у 2000 році. Однак використання цих оптичних систем зйомки полягає в тому, що ці технології

не можуть проникати крізь хмари, які зберігаються над багатьма частинами тропіків у вологий сезон і, фактично, протягом усього року в багатьох тропічних гірських і рівнинних регіонах. Це ефективно зменшує кількість прольотів Landsat, які дослідники можуть використовувати для картографування і моніторингу тропічних лісів, оскільки можуть пройти місяці або роки, перш ніж безхмарні знімки Landsat стануть доступними для певних хмарних місць [6].

Іншим застосуванням супутникових даних низького і середнього оптичного діапазону є картографування вигорілих територій внаслідок пожеж у тропічних лісах. Таким чином, дані дистанційного зондування можна використовувати для отримання інформації про вигорання біомаси, яка може вказувати на величину і часову динаміку зміни лісового покриву через вирубку лісів внаслідок пожеж.

Супутникові дані з високою роздільною здатністю, такі як IKONOS і Quickbird, представляють нове покоління супутників дистанційного зондування. IKONOS має просторову роздільну здатність 1 м для панхроматичних зображень і 4 м для мультиспектральних зображень, а його майбутні наступники, як повідомляється, генеруватимуть зображення з просторовою роздільною здатністю приблизно 50 см. Супутник Quickbird, запусканий у жовтні 2001 року, очолює список якісних систем оптичного дистанційного зондування з панхроматичними зображеннями з просторовою роздільною здатністю 70 см. У більшості аспектів супутник IKONOS та отримані ним зображення подібні до супутника Quickbird. Обидва ці супутники з їх просторовою роздільною здатністю обіцяють підвищити точність інвентаризації лісових ресурсів. Ці знімки були використані для перевірки продуктів, отриманих на основі даних з нижчою роздільною здатністю. Вони також були протестовані для класифікації лісового землекористування і земного покриву, а також для оцінки лісової біомаси і виявлення вибіркових рубок. Однак IKONOS та Quickbird мають обмеження

спектральної та просторової роздільної здатності. Вони не мають діапазонів у середній і тепловій інфрачервоній області електромагнітного спектра, а дані IKONOS і Quickbird також мають менше доступних діапазонів, ніж дані Landsat, що не дозволяє проводити багатоспектральний аналіз. Це є недоліком для спектральної дискримінації типів рослинності. Незважаючи на відмінності, всі джерела даних можна використовувати разом для створення різноманітних рішень.

2.4 Методи класифікації лісового покриву

Класифікація цифрових зображень - це процес призначення пікселів до певних класів. Зазвичай кожен піксель розглядається як окрема одиниця, представлена значеннями в кількох спектральних.

Метод неконтрольованої класифікації використовується для виявлення природних груп або структур в мультиспектральних даних. Тільки після цього групам присвоюються інформаційні мітки. Недоліком і обмеженням цих методів є, передусім, залежність від "природного" групування та складності в порівнянні цих груп з інформаційними категоріями, які цікавлять інтерпретатора. Крім того, інтерпретатор обмежений контролем над меню класів та їхніми конкретними ідентифікаторами.

Метод керованої класифікації - це процес використання зразків відомої ідентичності (навчальної області або навчального поля) і застосування його до всього зображення. Кожне примітивне зображення характеризується n спостереженнями (значеннями в n каналах даних). Навчальні вибірки є векторами в n -вимірному просторі (просторі ознак). Керований класифікатор використовує розподіл навчальних вибірок для кожного класу для оцінки функцій щільності в просторі ознак і поділу простору на області класів. Цей метод має багато недоліків. По-перше, аналітик, по суті, насилає структуру класифікації на дані. По-друге, навчальні дані часто визначаються за

інформаційними категоріями і лише в другу чергу - за спектральними властивостями. Навчальна ділянка, яка є "100% лісом", може бути точною щодо позначення "ліс", але може бути дуже різноманітною щодо щільності, віку, затіненості тощо, а отже, формувати неякісну навчальну ділянку. По-третє, навчальна ділянка, обрана аналітиком, може не бути репрезентативною для умов, що зустрічаються на всьому знімку. По-четверте, сумлінний вибір навчальних даних може бути трудомістким, дорогим і нудним заняттям, навіть якщо під рукою є достатньо ресурсів. Нарешті, контрольована класифікація може бути не в змозі розпізнати і представити особливі або унікальні категорії, не представлені в навчальних даних. Таким чином, застосування цих методів для ізольованої класифікації може бути несатисфакційним.

2.5 Методи дослідження стану лісових дерев

Роль окремих джерел мінливості у відбивній здатності рослинності регулюється розсіюванням і поглибленням електромагнітних хвиль різної довжини [1]. Типовий коефіцієнт відбиття здорової рослинності характеризується низьким показником відбиття у видимому діапазоні, за винятком зелених хвиль, різким зростанням в області червоного краю (~700 нм; RE), високим показником відбиття в ближньому інфрачервоному (NIR) діапазоні і зменшенням близько 1500 нм у короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) частині спектру [2]. У видимому діапазоні показник відбиття в значній мірі залежить від вмісту пігменту [9]. В RE-області спостерігається перехід від сильного поглиблення хлорофілом до високого відбиття в NIR-області, пов'язаного з розсіюванням внутрішніх структур листя та крони [9–11]. Частина SWIR-спектру чутлива до вмісту води в листі та кроні [10, 12]. Відбивна здатність рослинності змінюється протягом вегетаційного періоду, відповідаючи фенологічному циклу. Мінливість

відбиття більш виражена у листяних породах; однак вічнозелені хвойні дерева також демонструють сезонні коливання відбивної здатності [8].

Щодо віку насадження, зміни в відбивній здатності пологів рослинності пов'язані з фізіологічними та структурними властивостями рослинності. Загалом молоді дерева, як правило, мають вищу відбивну здатність, ніж старі. Зі збільшенням віку дерева відбувається зниження фотосинтезу листя. У випадку хвойних дерев індекс площі листя (LAI) корелює з віком дерева [9], а вік хвої впливає на пропускання та відбиття ближнього інфрачервоного діапазону [10]. У випадку широколистяних лісів також повідомлялося про вплив віку лісу на відбивну здатність у ближньому інфрачервоному діапазоні. Однак диференціація класів віку насаджень є скоріше результатом структурних відмінностей, наприклад, у дуже молодих лісових насадженнях у відбивній здатності може переважати рослинність підліску або ґрунти. З іншого боку, у старших насадженнях збільшується шорсткість пологів лісу, спостерігається менша щільність стебла, а проміжки більші та більші, що зумовлює збільшення затінення і, відповідно, нижчу відбивну здатність насаджень. Крім того, існує вплив рослинності підліску на відбивну здатність насаджень, і вона змінюється протягом вегетаційного періоду. Зокрема, при відкритому закритті крони, більше рослинності підліску можна побачити за даними дистанційного зондування, а внесок у розріджених кронах може бути навіть більшим від підліску, ніж сама відбиття крони дерев [11]. Таким чином, на рівні насаджень вплив фонового сигналу може відрізнитися в насадженнях із подібним видовим складом, але різною зімкнутістю крони або формою крон. Вищезазначені залежності були використані в дослідженнях для прогнозування та класифікації віку лісових насаджень із використанням даних оптичного дистанційного зондування та визначення сукцесійних стадій лісів.

Інші фактори, які впливають на відбиття рослинності, включають умови ділянки. Різне освітлення та світлове середовище можуть впливати на оптичні властивості листя та хвої [6]. У випадку листяних видів існує велика фенологічна мінливість, викликана температурними градієнтами, пов'язаними з висотою, і місцевим мікрокліматом [5-7]. Як правило, існує негативна кореляція між початком листя та висотою [6]. У дослідженнях дистанційного зондування було повідомлено про вплив зміни висоти на значення відбивної здатності для паперової берези [8] і ялини [9]. Крім того, повідомляється про стрес, пов'язаний з висотою дерев. Порушення дерев можуть суттєво впливати на відбивну здатність насаджень, спричиняючи, наприклад, зміну кольору листя та дефоліацію. Відмінності в відбивній здатності між тими самими видами дерев також можуть виникати через родючість ділянки, яка також може впливати на відбивну здатність лісової підстилки. Проте вплив усіх згаданих вище аспектів на відбивну здатність лісу ще не повністю досліджено на рівні насаджень, як, наприклад, те, що видно на супутникових знімках з високою роздільною здатністю.

За допомогою супутникових зображень тепер можна вивчати властивості рослинності та вплив умов на відбивну здатність на більших масштабах і з більшою частотою. Висока часова роздільна здатність є важливою, оскільки зміни рослинності можуть бути дуже швидкими, особливо на початку та в кінці вегетаційного періоду. В останні роки знімки Sentinel-2 успішно використовуються для визначення різних властивостей лісових насаджень. З просторовою роздільною здатністю 10 і 20 метрів зображення Sentinel-2 дозволяють оцінювати як на рівні дерева, так і на рівні насадження [8]. Цикл повторення місії Sentinel-2 становить від двох до п'яти днів. Крім того, датчики Sentinel-2 забезпечують 13 спектральних смуг, зокрема смуги SWIR та RE є перспективними для аналізу властивостей рослинності. При вивченні зв'язків між запасами та обсягом, зокрема, смуга SWIR1 Sentinel-2 була охарактеризована як висококорельована [6]. Подібним

чином слід досліджувати роль трьох вузьких смуг RE, оскільки, наприклад, смуга RE1 була визнана найважливішою для прогнозування параметрів структури лісу [6].

2.6 Висновки

Супутникові дані для отримання інформації здобуло широке визнання у контексті ефективної охорони та управління лісами. Методи на основі використання спектральних характеристик є необхідним для системного отримання повторюваних біофізичних даних для обширних географічних областей при розумних витратах, дотримуючись високого рівня точності та ефективності.

Засоби дистанційного зондування успішно використовуються для картографування різних типів лісів та земельного покриття. Відтак, виявляється значна можливість використання дистанційного зондування для забезпечення даних щодо лісових і нелісових площ, необхідних для оцінки земельного потенціалу лісового господарства та для здійснення сталого управління лісовими ресурсами.

3 ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ СТАНУ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ ЗА ДАНИМИ ОПТИЧНОЇ СУПУТНИКОВОЇ ЗЙОМКИ

3.1 Опис алгоритму технології

Незважаючи на те, що загальні принципи відбивної здатності лісових насаджень добре вивчені і описані в розділі, все ще потрібна детальна інформація про закономірності змінності відбивної здатності в просторі та часі. Особливо важливий багатоваріантний аналіз, включаючи різні властивості ділянки та насадження як предиктори, оскільки зазвичай ці чинники розглядаються окремо. Ці співвідношення слід вивчати для різних видів дерев, як листяних, так і вічнозелених. Загалом ця інформація є важливою для інтерпретації сигналів дистанційного зондування, аналізу спектральних моделей рослинності та розуміння відповідних факторів [2]. Крім того, необхідно зрозуміти, як різні властивості насаджень впливають на коефіцієнт відбиття з точки зору оцінки лісових змінних із супутникових зображень [7]. Завдяки цим знанням супутникові знімки можуть бути використані для визначення особливостей насаджень, таких як видовий склад, щільність, об'єм запасів і біомаса або вік насаджень [9]. Розуміння впливу властивостей лісових насаджень і умов місцевості на відбивну здатність лісу має вирішальне значення для застосування технологій дистанційного зондування для моніторингу лісових екосистем. Пов'язування різноманітності відбивної здатності лісу, спричиненої різними насадженнями та характеристиками ділянки, дозволяє застосовувати супутникове дистанційне зондування в інвентаризації лісів. Результати досліджень також можуть мати значення при оцінці лісових ділянок. Особливо при аналізі великих географічних просторів з різними умовами, наприклад, що характеризуються широким діапазоном висот, і властивості лісових насаджень, ці фактори слід враховувати.

Це дослідження має на меті оцінити, як різні параметри лісових насаджень та умови місцевості впливають на відбивну здатність лісових насаджень у насадженнях звичайного бука, ялиці та сосни звичайної в гірських районах, зокрема в польських Карпатах. Щільні часові ряди Sentinel-2 використовуються для забезпечення комплексного аналізу, що показує специфічні для видів і місцевості спектральні реакції в різних частинах вегетаційного періоду. Новизна дослідження полягає в одночасному врахуванні впливу умов місцевості, структури насаджень, віку дерев і підліскової рослинності на відбивну здатність широколистяних і хвойних лісів. Зокрема, досліджено вплив наступних параметрів на відбивну здатність лісових насаджень:

- умови ділянки: висота, вид і нахил;
- структура лісу: густота деревостану та зімкнутість крон;
- вік дерева;
- підлісок тип рослинності.

На рис.3.1 наведено алгоритм технології, який розглянемо детально.

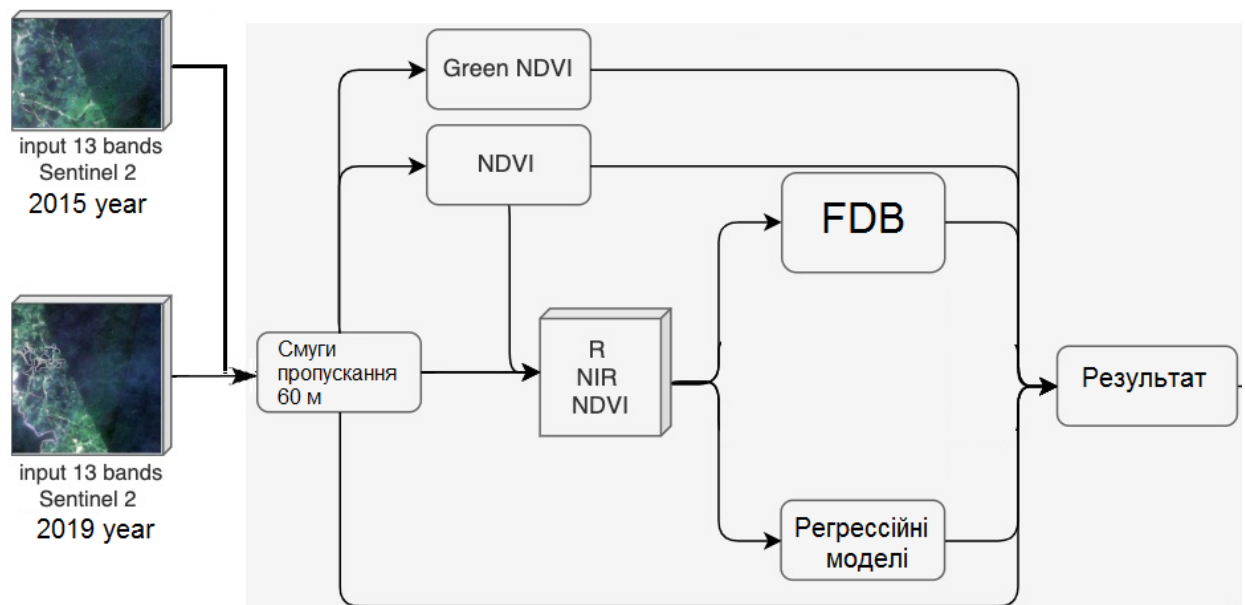


Рисунок 3.1 – Алгоритм технології

Збір і попередня обробка супутникових знімків. У цьому дослідженні використовувалися мультитимові зображення Sentinel-2 за 2015 та 2019 роки (рис 3.2). Хоча «базовим» роком для нашого аналізу був 2019 рік, ми використали три зображення Sentinel-2 за травень 2018 року, оскільки дані цієї частини сезону в 2019 році були відсутні через сильну хмарність. Продукти Sentinel-2 Bottom-of-Atmosphere були завантажені за допомогою пакета sen2r [11]. Місце дослідження містило чотири плитки Sentinel-2 (34UFA, 34UFV, 34UEA та 34UFV). Було використано десять діапазонів з 10- та 20-метровою просторовою роздільною здатністю, тобто видимий синій, зелений і червоний, RE 1–3, NIR 1–2 і SWIR 1–2. Усі зображення з хмарним покривом менше 30% були завантажені, а потім вони були додатково візуально перевірені на наявність хмар. Зрештою, для аналізу було відібрано 16 дат. Для вибраних зображень було застосовано хмари, хмарні тіні та снігове маскування. Ці маски були отримані з класифікаційного продукту Sentinel Land Cover [10], а маскування було виконано в QGIS за допомогою растрового пакету.

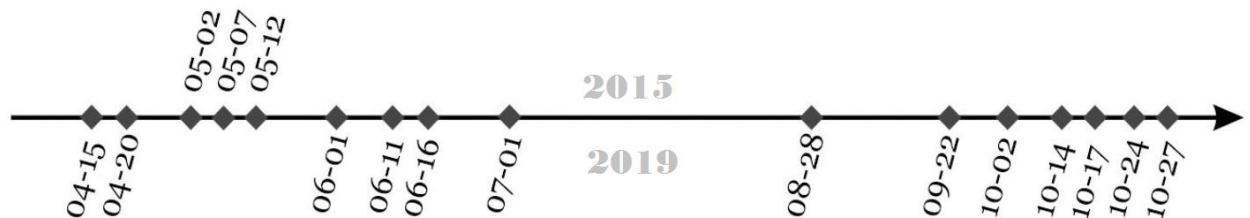


Рисунок 3.2 – Дати знімання Sentinel-2 у 2015 та 2019 роках

Після першого етапу отримуємо вхідне зображення, що містить 13 смуг (4 із роздільною здатністю 10 метрів, 6 із роздільною здатністю 20 метрів і 3 із роздільною здатністю 60 метрів). У першу чергу, смуги з роздільною здатністю 60 метрів відкидаються, оскільки їхня роздільна здатність є занадто низькою для даного застосування. Потім червоний (R) і ближній інфрачервоний (NIR) діапазони використовуються для обчислення NDVI:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad (3.1)$$

NDVI є показником вмісту рослинності в пікселі, оскільки рослинність сильно відбиває ближній інфрачервоний діапазон. Нюанси в NDVI можуть бути приписані різним типам рослинності, тож він може давати різний сигнал між корінним лісом та плантаціями. Аналогічно розраховується зелений NDVI, використовуючи зелену смугу замість червоної та зелену смугу замість ближнього інфрачервоного:

$$\text{Green NDVI} = (\text{NIR} - \text{G}) / (\text{G} + \text{R}) \quad (3.2)$$

Наступні кроки обробки застосовуються до зображень R (червоний канал зображення), NIR і NDVI через їхню просторову роздільну здатність 10 метрів та їхню потенційну дискримінаційну здатність для елементів рослинності. Кожен із трьох діапазонів відкривається реконструкцією за допомогою структурного елемента у формі диска радіусом 5. Ця процедура спрямована на видалення дрібних яскравих елементів, але зі збереженням структури оригінального зображення (на відміну від простої операції відкриття).

З банку лісових даних (FDB) за 2019 рік були отримані довідкові дані щодо видів лісових насаджень. FDB є вільно доступним набором даних, що містить інформацію про державні ліси в Польщі. Він включає так звані підрайони (насадження), тобто однорідні лісові ділянки, для яких відома частка окремих порід.

Інформація, використана для нашого дослідження, включала частку видів дерев, вік дерев, зімкнутість крони, густоту насадження та рослинність підліску. Для аналізу відбивної здатності були відібрані лише деревостани з 100% часткою певної породи дерев. Усього було відібрано 12,235 насаджень, зокрема 2,726 насаджень бука звичайного, 2,201 насадження ялиці звичайної та 7,308 насаджень сосни звичайної. Середній розмір досліджуваних насаджень становив 8.6 га. Вік проаналізованих букових насаджень коливався від 4 до 174 (середнє 87.5), ялиць від 5 до 162 (середнє 82.8), сосен від 2 до 151 року (середнє 68.6).

Для кожного деревостану інформація про властивості була взята з FDB, такі як вік деревостану, зімкнутість крон, густина деревостану та підлісок (вид і частка).

Мікроклімат тісно пов'язаний з рельєфом, який визначає кліматичні умови. Тому, щоб охарактеризувати умови місця як непрямі наслідки регіональних кліматичних коливань, ми використовували висоту над рівнем моря. Варіації місцевого мікроклімату також характеризуються висотою та нахилом. Топографічні характеристики були розраховані за допомогою цифрової моделі рельєфу (DEM) з роздільною здатністю 1 метр, отриманої від польської IT-системи захисту країни від екстремальних небезпек. DEM була повторно відібрана до 10-метрової роздільної здатності, а нахил і аспект були розраховані (Таблиця 3.1). Потім для кожного багатокутника насаджень були визначені середні значення екологічних змінних.

Таблиця 3.1 – Зміни прогнозування

Характеристики	Змінні	Опис і одиниці виміру
Умови	Висота	Метри над рівнем моря
	Схил	Ступені
	Аспект	Ступені
Стаціонарні властивості	Вік	років
	Змикання коронки	1 (відкритий)
		2 (розріджений)
		3 (помірний)
		4 (близько)
Щільність деревостану	Визначається шляхом порівняння об'єму насадження (об'єму деревини), що фактично існує в насадженні даної породи на 1 гектар, з	

		<p>потенційним об'ємом, отриманим шляхом порівняння таблиць урожайності повністю укомплектованого насадження з даним індексом ділянки. Наприклад, якщо фактичний об'єм насадження становить 240 м³/га, а в таблицях врожайності зазначено 300 м³/га, то густина насадження $240/300 = 0,80$. Рідко має значення вище 1.</p>
	Підлісок рослинність	Хвойні/широколистяні: від 0 (без підліску) до 10 (повний підлісок)
		Крім того, у насадженнях сосни звичайної з метою візуалізації використано інформацію про домінуючі породи підліску (бук, дуб, ялиця).

Нарешті, для подальшого аналізу середні значення відбиття з кожної смуги Sentinel-2 для всіх досліджуваних дат були вилучені в полігони.

Завершальним є застосування регресійних моделей. По-перше, для визначення впливу різних властивостей на відбивну здатність деревостану ми провели попередній аналіз. Це було здійснено за допомогою кореляційних матриць та візуального аналізу діаграм розсіювання. Крім того, до наших даних було застосовано функцію очищення для вилучення викидів, які

можуть виникати внаслідок помилкових спостережень. Багатофакторні викиди були ідентифіковані за допомогою детермінанта мінімальної коваріації.

На основі результатів попереднього аналізу, використовуючи ключові змінні для вибраних дат і діапазонів, ми побудували регресійні моделі. Середні значення відбивної здатності для десяти аналізованих смуг Sentinel-2 використовувалися як залежні змінні. Ми використали узагальнені адитивні моделі (GAMs), де залежна змінна моделюється як сума різних функцій згладжування. GAM є гнучкими та легкими для інтерпретації, і вони можуть моделювати складні відносини. Ефективність моделей оцінювалася за допомогою скоригованого коефіцієнта детермінації (R^2). Були побудовані як однофакторні, так і багатофакторні регресійні моделі. GAM було розроблено в середовищі Python.

3.2 Область дослідження

Для проведення аналізу було обрано тестову область площею приблизно 13 000 км². Ця область включає 28 лісових округів – основні одиниці управління лісами в структурі державних лісів Польщі та розташовані у південно-східній частині країни (див. рис. 3.3). Лісові округи були відібрані згідно двох критеріїв: розташування в Карпатах, передгір'ї Карпат або зовнішнього Підкарпаття. Територія дослідження охоплює гірські райони (Лесисте та Середні Бескиди), гірські передгір'я (Середньо-Бескидське передгір'я) та улоговину (Сандомирська улоговина). На вибраній області висота коливається від 150 до 1180 метрів над рівнем моря, і ліс покриває приблизно 38% території, переважно у гірських районах. Домінуючими лісовими породами є бук звичайний (*Fagus sylvatica*), ялиця срібна (*Abies alba*) і сосна звичайна в передгір'ях та улоговинах (*Pinus sylvestris*;) – це три види, які були проаналізовані у цьому дослідженні. Системи лісового господарювання, що застосовуються на цій території,

адаптовані до породного складу лісу. Наприклад, насадження із переважанням бука обробляються за допомогою системи захисних дерев, насадження із переважанням ялиці срібної ведуться поетапними рубками, тоді як насадження сосни звичайної – головним чином суцільними рубками.

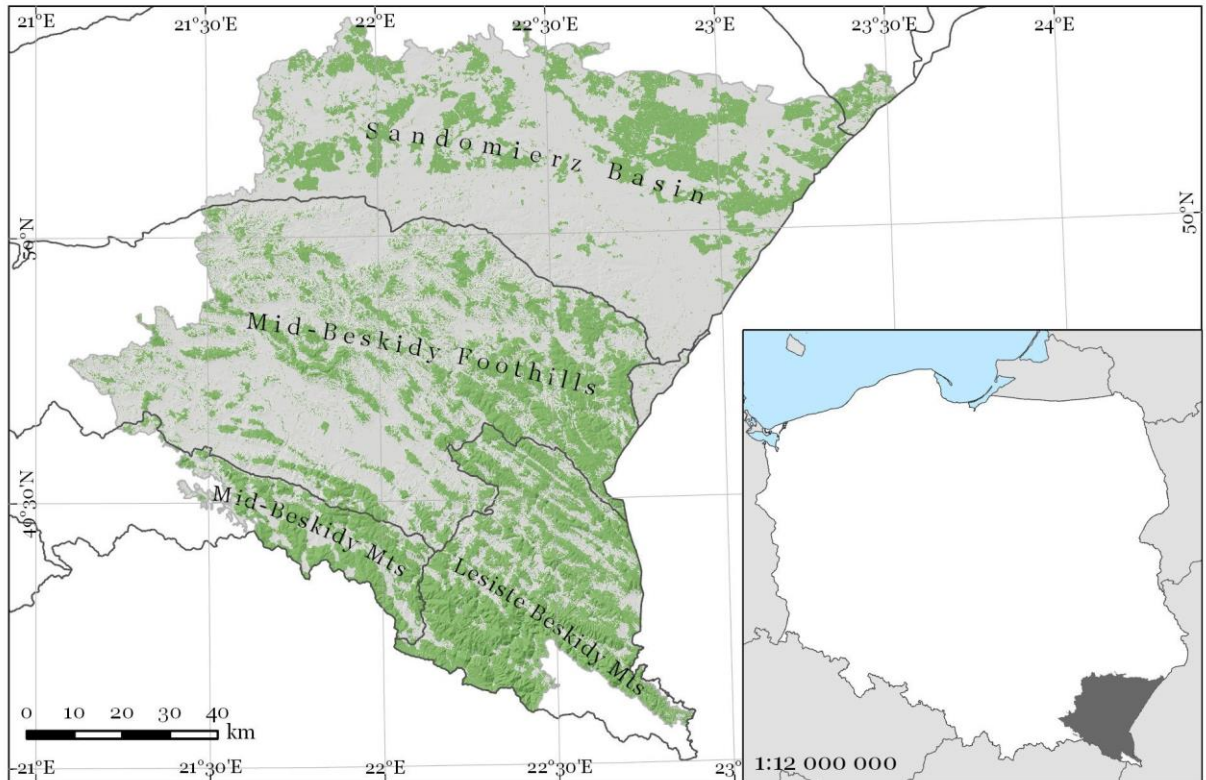


Рисунок 3.3 – Область дослідження

Модель – це абстрактне представлення об'єкта чи явища, конструкція для відтворення, ідеальна чи стандартна ситуація або досконала річ для імітації. У даному випадку термін "модель" вказує на спрощене представлення реальності, яке дозволяє обчислити результати без проведення реальних експериментів. Модель призначена для полегшення візуалізації, прогнозування та розрахунків, а також може бути виражена в математичній або обчислювальній формі.

В сфері оцінки землі Рамонд Колдуелл визначає "моделі" як комп'ютерні програми, які прогнозують результати землекористування на

конкретній земельній ділянці, використовуючи інформацію про характеристики землі на цій ділянці.

Моделювання – це процес розробки та використання таких моделей. Просторове моделювання - це аналітичні процедури, які використовуються в ГІС, а ГІС-моделювання - це процес створення нових ГІС-продуктів на основі існуючих. Існує ряд методологій екологічного моделювання, що базуються на оцінці факторів та їх комбінацій, або переважно на підході моделювання процесів.

У просторовому моделюванні виділяють три класи моделей: логічні, емпіричні та концептуальні (Heuvelink та ін., 1993):

- логічна модель імітує новий атрибут за допомогою простих правил;
- емпіричні моделі створені для опису чи імітації спостережуваних взаємозв'язків між змінними;
- концептуальна модель описує основні характеристики метеорологічного явища та визначає основні процеси, що відбуваються.

Модель лісового покриву – це набір процедур, за допомогою яких кількісно оцінюється придатність клітинки для нового дерева на основі вибраних екологічних змінних. Процедура використання моделі стану лісового покриву складається з: визначення критеріїв, визначення роботи ГІС; вхідні дані для моделі; створення моделі; виконання моделі та результати.

3.3 Програмна реалізація технології

Описана в пункті 3.2 технологія була реалізована в Python, програмний код наведено в додатку А. Для реалізації було використано scikit-image (skimage) – ця бібліотека використовується для завантаження та роботи з зображеннями. Конкретне використання в коді: `skimage.io.imread(image_path)` використовується для завантаження зображення за вказаним шляхом.

NumPy використовується для операцій з масивами та обчислень. Конкретне використання в коді: Робота з числовими масивами та обчисленнями для обробки зображень та розрахунку індексів рослинності.

Бібліотека Pandas використовується для роботи з даними у вигляді таблиць (DataFrame). Конкретне використання в коді: Ймовірно, Pandas використовується для структурування та аналізу довідкових даних про лісові насадження.

Математичні бібліотеки: для розрахунків та аналізу даних.

Методи для обчислення індексів рослинності (наприклад, NDVI і Green NDVI) використовують математичні формули та операції.

Scikit-learn використовується для побудови регресійних моделей та оцінки їх ефективності.

Реалізовано узагальнені адитивні моделі (GAMs) для побудови регресійних моделей, і scikit-learn може бути використаний для цього за допомогою бібліотеки mgcv.

Використання функцій для обчислення кореляційних матриць та очищення викидів вказує на можливе використання додаткових бібліотек, таких як SciPy або StatsModels.

3.4 Тестування технології

В таблиці 3.2 та рис.3.4 представлені результати моделей, як однофакторної, так і багатфакторної регресії. Прогнозні змінні для кожного виду включають різні аспекти, такі як висота, вік, густина, нахил, аспект і підлісок, і проводяться протягом різних сезонів року. Це вказує на те, що властивості лісових насаджень різних видів відрізняються і можуть бути краще передбачені, враховуючи ці різноманітні аспекти та сезонні варіації.

Таблиця 3.2 – Результати GAMs

Види	Прогностичні змінні	Дати
Бук	Висота	Весна, осінь
	Вік	Літо
	Підлісок рослинність	Весна, осінь
	Висота + нахил + аспект	Весна, осінь
Ялиця	Вік	Весь рік
	Вік + густина деревостану + ухил	Весь рік
Сосна	Вік	Весь рік
	Густина стояння	Весь рік
	Підлісок	Весь рік
	Вік + густина насадження + висота + підлісок	Весь рік

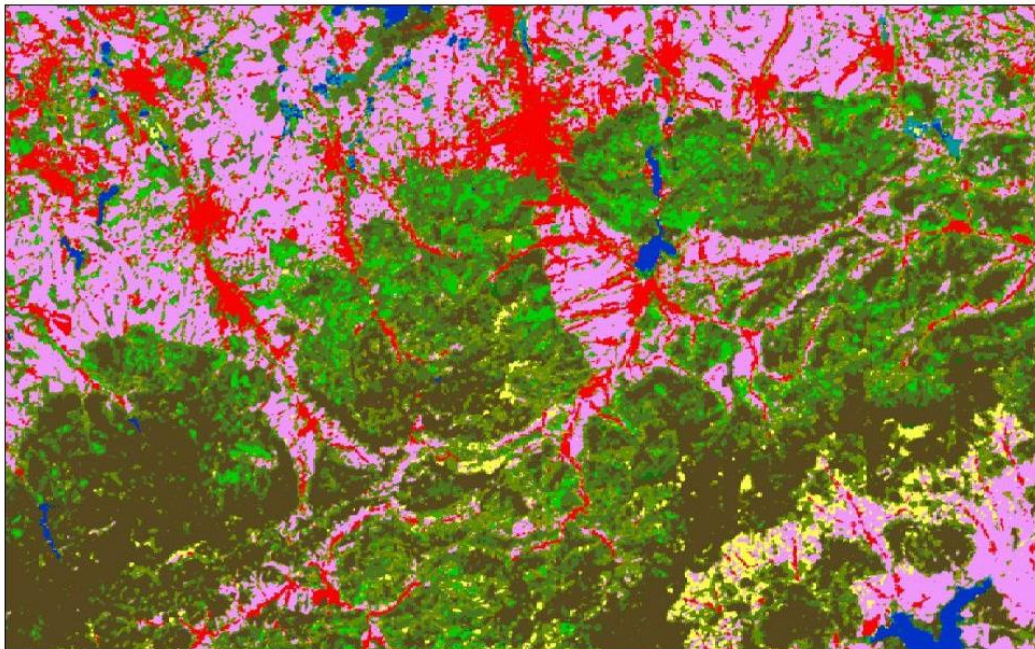


Рисунок 3.4 - Результат GAMs

На рисунку 3.5 представлена класифікація лісового покриву за 2015 та 2019 роки. Під час аналізу можна відзначити, що у 2019 році кількість хвойних дерев збільшилась у порівнянні з 2015 роком, коли домінували широколистяні види.

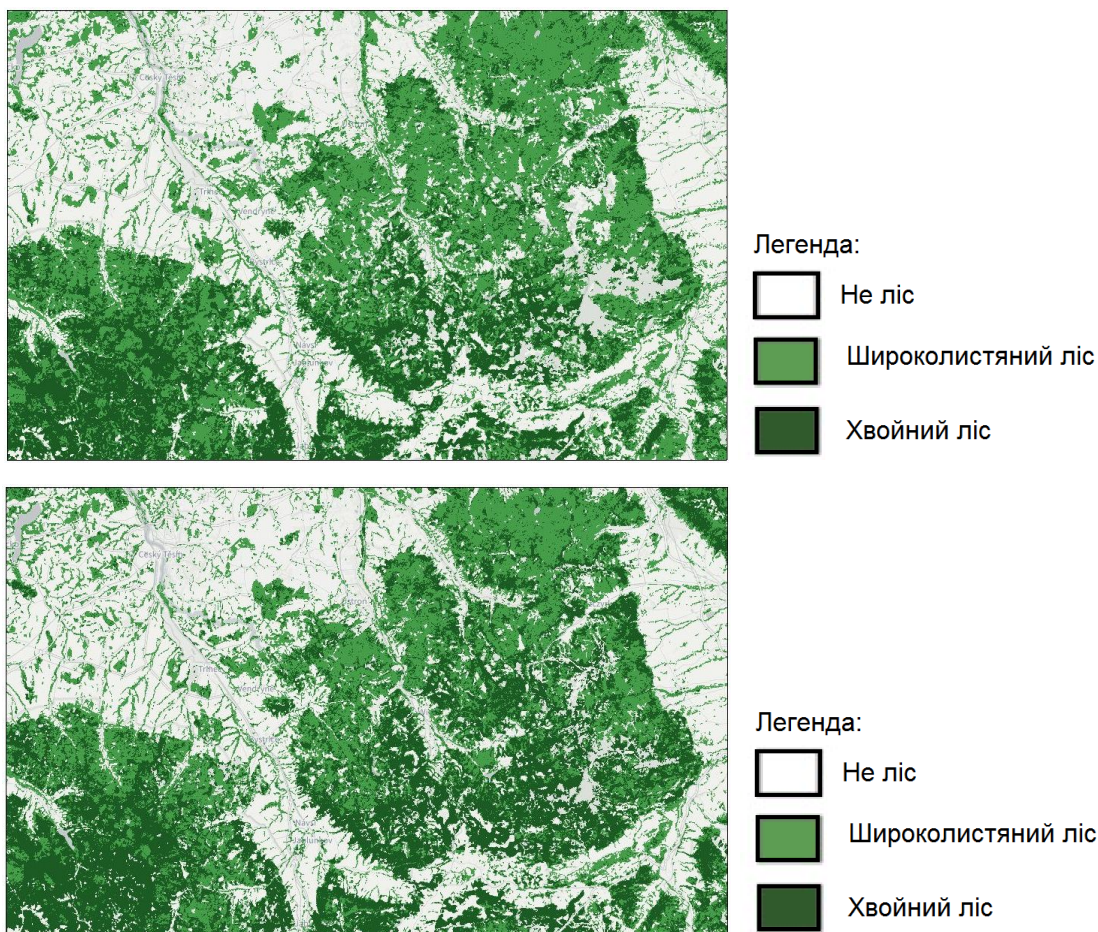


Рисунок 3.5 – Класифікація лісового покриву

Зміни в кліматі можуть впливати на розподіл і розвиток різних видів рослин, зокрема, дерев у лісі. Збільшення або зменшення температур, кількості опадів і інших кліматичних факторів може сприяти або обмежувати розвиток певних видів дерев.

Зміни щільності деревного покриву між 2015 та 2019 роками, які виокремлено в класифікації за кольорами та параметрами, вказують на істотні зміни у розподілі деревного покриву (рис.3.6). Так, в 2019 році щільність в діапазоні від 1 до 40%, в той час, коли у 2015 році від 61 до 90%.

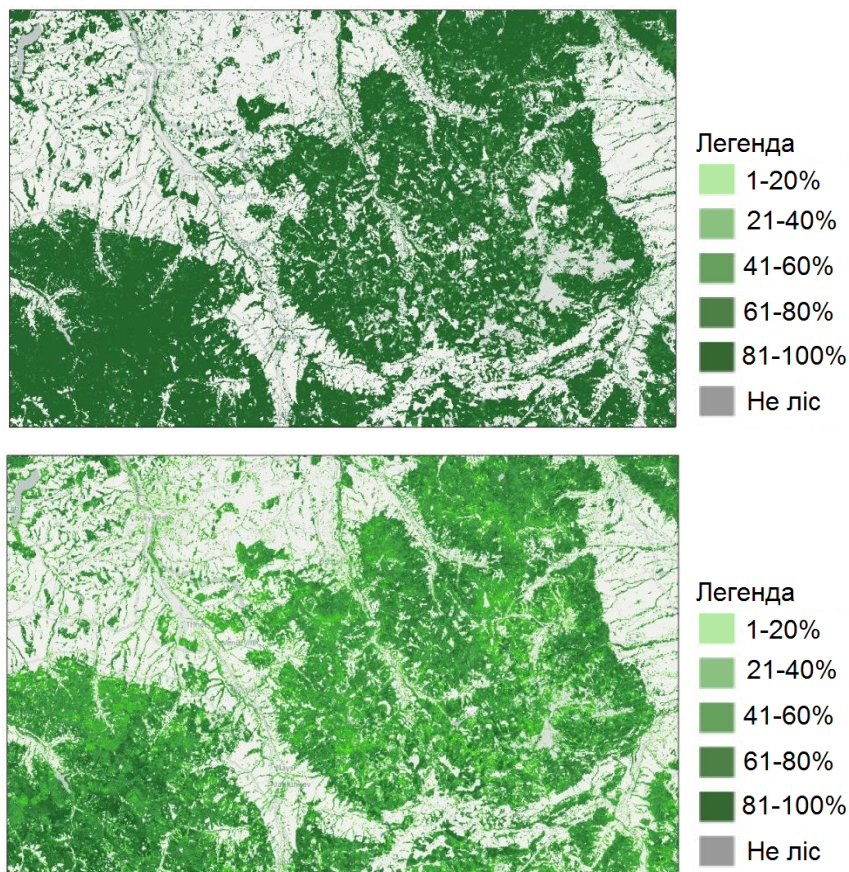


Рисунок 3.6 – Щільність дерев'яного покриву

Можливо, за цей період часу були введені нові програми збереження або відновлення лісів, що може призвести до змін щільності деревного покриву в різних класах.

Проведено дослідження динаміки зміни лісового покриву в період від 2015 до 2019 року. На рисунку 3.7 представлена модель досліджуваної області з поділом на наступні класи: незмінна площа лісового покриву, новий лісовий покрив, втрата лісового покриву та незмінні ділянки з деревним вкриттям. Візуальний аналіз показує, що більша частина території лісового покриву залишилась незмінною, проте можна виявити втрачені ділянки лісу.

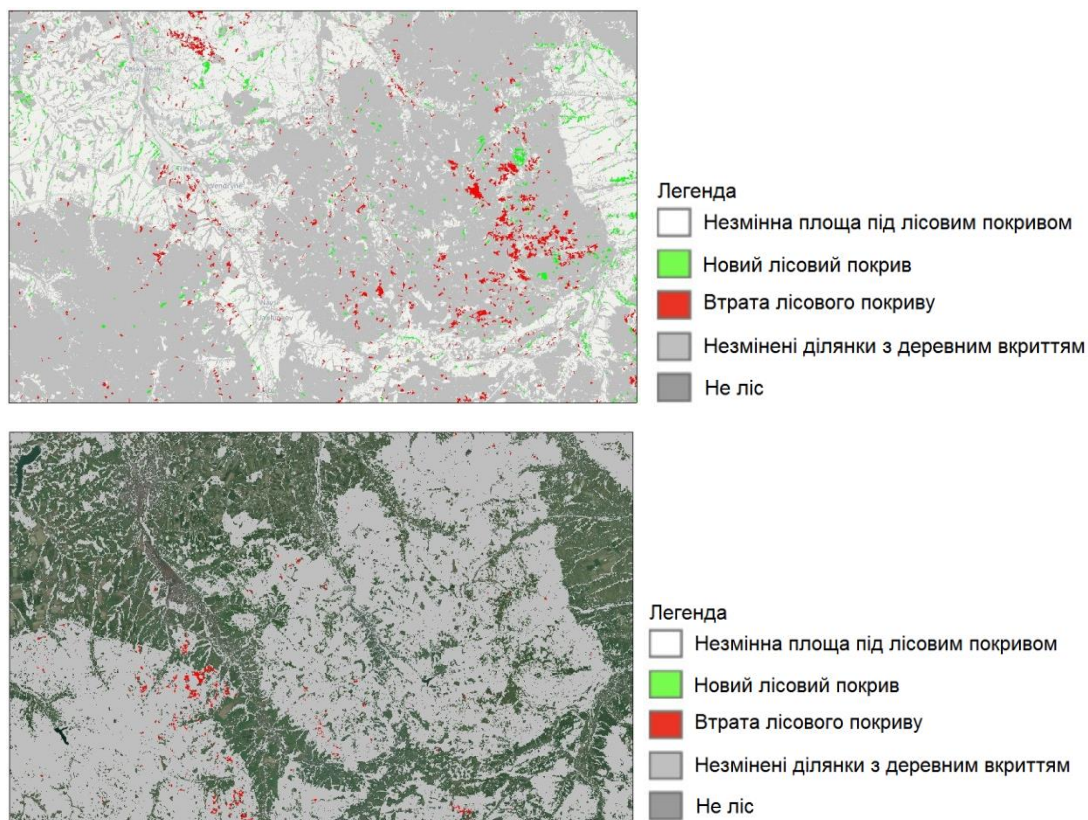


Рисунок 3.7 – Дослідження динаміки лісу

Дослідимо детально лісовий покрив та його стан. Висота над рівнем моря виявилася ключовим фактором, який впливає на зміну відбивної здатності букових насаджень, особливо навесні (початок травня) та восени (середина жовтня; таблиця 3.3). За результатами досліджень виявлено, що висота є більш важливою, ніж обидві інші розглянуті змінні середовища.

Таблиця 3.3 – Значення R^2 для регресії GAM

Види	Передбачувані фактори	Дата	Група	Скоригований R^2
Бук	Висота	2 травня	Синій	0,57
			NIR1	0,50
		12 травня	Зелений	0,40
			RE1	0,44
	Вік	1 липня ^{вул}	NIR1	0,33
	Підлісок	15 квітня	SWIR1	0,28 (усі деревостани) 0,55

Види	Передбачувані фактори	Дата	Група	Скоригований R ²
				(повнота < 0,5)
		27 жовтня	SWIR1	0,22 (усі деревостани) 0,41 (повнота < 0,5)
	Висота + нахил + аспект	12 травня	RE1	0,6
		17 жовтня	NIR1	0,56
Ялиця	Вік	20 квітня	NIR1	0,58
		22 вересня	RE2-RE3	0,53
	Вік + густина деревостану + ухил	20 квітня	NIR1	0,61
		12 травня	Зелений	0,57
Сосна	Вік	1 липня вул	SWIR1	0,17
	Густина стояння	1 липня вул	NIR1	0,29
	Підлісок	20 квітня	SWIR1	0,40 (густина < 0,5)
	Вік + густина насадження + висота + підлісок	1 липня вул	NIR1	0,49
		20 квітня	SWIR1	0,50

Детально зосередимо увагу на «бук звичайний». У літній період, з червня по вересень, вплив висоти був невеликим, тоді як вплив віку насадження на відбивну здатність став більш помітним. Молодші насадження мали вищу відбивну здатність, а найсильніший вплив віку спостерігався в регіоні RE2-NIR2. Максимальні значення R² досягалися в діапазоні NIR1 1 липня (0,33).

Також виявлено відмінності між буковими насадженнями з різними умовами рослинності підліску (рис. 3.8).

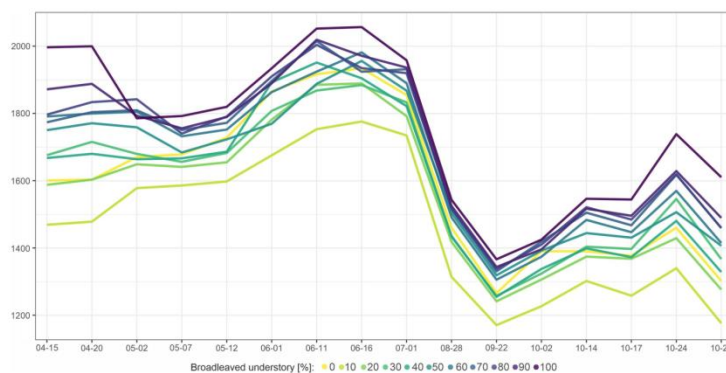


Рисунок 3.8 – Вплив частки широколистяного підросту на відбивання букових деревостанів у смузі SWIR1

Загалом, насадження з меншою часткою широколистяного підліску характеризувалося нижчою відбивною здатністю. Найсильніший вплив виявлено в SWIR частині спектра, а також спостерігалось в червоних і RE1 смугах в ранню весну (квітень) і восени. Вплив підліску спостерігався особливо в насадженнях з рідкісною зімкнутістю крони та меншою щільністю насадження, де максимальні значення R^2 між широколистяним підліском і відбивною здатністю становили 0,55 для SWIR1 15 квітня (коли були лише насадження з щільністю менше 0,5), 0,32 (повнота < 1) і 0,28 (усі деревостани). Протягом осені максимальні значення R^2 спостерігалися 27 жовтня, а саме 0,41 (повнота насаджень < 0,5), 0,28 (повнота насаджень < 1) і 0,22 (усі насадження), також у діапазоні SWIR1. Слабші зв'язки також спостерігалися для RE1 і видимих червоних смуг весною та восени.

3.5 Висновки

В даному розділі проведено аналіз сучасних підходів до оцінки лісових ресурсів, зокрема традиційних методів для дослідження стану лісових насаджень на оптичних знімках. Розглянуто аналіз проблеми дослідження, фізичні характеристики падаючого випромінювання, методи картографування та класифікації лісового покриву, а також методи дослідження стану лісових дерев.

Наведено опис алгоритму технології, визначено область дослідження, представлено програмну реалізацію технології та проведено тестування результатів.

У результаті дослідження встановлено, що розроблена технологія моделювання забезпечує ефективний аналіз стану лісових насаджень за допомогою оптичних супутникових знімків. Технологія демонструє високу точність та надійність результатів, забезпечуючи широкі можливості для подальших досліджень та використання в практичних задачах оцінки лісових ресурсів.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота на тему: "Інформаційна технологія моделювання показників стану лісових насаджень за даними оптичної супутникової зйомки" висвітлює актуальні питання оцінки та моніторингу стану лісового покриву, використовуючи сучасні методи та технології.

У першому розділі проведено огляд сучасних підходів до оцінки лісових ресурсів, включаючи традиційні методи моніторингу, застосування ГІС технологій та використання космічних знімків. Зроблені висновки наголошують на важливості використання сучасних технологій для отримання точної та актуальної інформації про стан лісів.

Другий розділ присвячено огляду методів для дослідження стану лісових насаджень на оптичних знімках. Розглянуті методи картографування, класифікації лісового покриву та дослідження стану лісових дерев. Здійснений аналіз проблеми дослідження та фізичних характеристик випромінювання надає підґрунтя для розробки нових технологій.

Третій розділ розглядає технологію моделювання показників стану лісових насаджень за даними оптичної супутникової зйомки. Розроблений алгоритм та програмна реалізація технології дозволяють ефективно моделювати та аналізувати дані для отримання детальної інформації про лісові ресурси.

Досліджено вплив семи різних властивостей лісу та ділянки на відбивну здатність для трьох видів дерев. Отримані результати вказують на значну мінливість відбивної здатності підставки, яка змінюється залежно від довжини хвилі та пори року.

Визначено, що ключовим фактором мінливості відбивної здатності букових насаджень є їхня висота. Цей фактор сильно впливає на фенофази, особливо в навесні та восени. Весною спостерігається динамічна зміна відбиття в залежності від висоти, а восени найбільший вплив висоти

спостерігається в діапазонах RE та NIR. Інші чинники, такі як частка широколистяного підліску, вид і вік насаджень, також виявили вплив на відбивну здатність букових насаджень, особливо влітку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Джулай Б.Р., Беленок В. Ю. Геоінформаційний аналіз змін лісовкритих площ регіону за даними ДЗЗ: ХХІІІ всеук. наук.-практ. конф., м. Київ, 4-7 квіт. 2023 р., Київ, 2023. С. 14-15
2. Бондаренко Е.Л. Особливості вдосконалення ГІС для вирішення проблемно-орієнтованих завдань еколого-географічного картографування. Картографія та вища школа. Київ, 2007. № 12. С. 51–57.
3. Світличний О.О., Плотницький С.В. Основи геоінформатики. Навчальний посібник. Суми, 2006. 295 с.
4. Лакида, П. І., & Миронюк, В. В. (2018). Методичні рекомендації щодо оцінки стану та динаміки лісів за даними ДЗЗ. Київ: НУБіП України.
5. Ollinger SV. Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytol.* 2011;189: 375–394.
6. ACHARD, F., H.D. EVA, H.-J. STIBIG, P. MAYAUX, J. GALLEGRO, T. RICHARDS and J.-P.MALINGREAU. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science* 297, 2002.
7. Fassnacht FE, Latifi H, Sterenczak K, Modzelewska A, Lefsky M, Waser LT, et al. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sens Environ.* 2016;186: 64–87.
8. Roberts DA, Ustin SL, Ogunjemiyo S, Greenberg J, Bobrowski SZ, Chen J, et al. Spectral and structural measures of northwest forest vegetation at leaf to landscape scales. *Ecosystems.* 2004;7: 545–562.
9. Mõttus, M.; Hernández-Clemente, R.; Perheentupa, V.; Markiet, V. In situ measurement of Scots pine needle PRI. *Plant Methods* 2017, 13, 1–8.
10. De Tomás Marín, S.; Novák, M.; Klančnik, K.; Gaberščik, A. Spectral signatures of conifer needles mainly depend on their physical traits. *Pol. J. Ecol.* 2016, 64, 1–13.

11. Hallik L, Kuusk A, Lang M, Kuusk J. Reflectance Properties of Hemiboreal Mixed Forest Canopies with Focus on Red Edge and Near Infrared Spectral Regions. *Remote Sens.* 2019;11: 1717.

ДОДАТОК А

Фрагмент Лістингу

```
# Імпорт необхідних бібліотек

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from skimage import io

from sklearn.linear_model import LinearRegression

from sklearn.metrics import r2_score

from scipy.ndimage import binary_erosion

# Завантаження супутникових знімків

def load_satellite_images(image_path):

    satellite_image = io.imread(image_path)

    return satellite_image

# Обробка вхідного зображення

def process_input_image(input_image):

    # Роздільна здатність смуг

    resolutions = [10, 10, 10, 10, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 60, 60, 60]

    # Відкидаємо смуги з роздільною здатністю 60 метрів

    input_image = input_image[:, :, :9]

    # Розрахунок NDVI

    R = input_image[:, :, 3] # червоний канал

    NIR = input_image[:, :, 8] # ближній інфрачервоний канал
```

```
NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)
```

```
# Розрахунок зеленого NDVI
```

```
G = input_image[:, :, 1] # зелений канал
```

```
Green_NDVI = (NIR - G) / (G + R)
```

```
return R, NIR, NDVI, Green_NDVI
```

```
# Очищення від викидів
```

```
def outlier_removal(data, threshold=3):
```

```
    mean = np.mean(data)
```

```
    std = np.std(data)
```

```
    outliers = (data - mean) / std > threshold
```

```
    data[outliers] = 0
```

```
    return data
```

```
# Завантаження довідкових даних про лісові насадження
```

```
def load_forest_data(forest_data_path):
```

```
    forest_data = np.loadtxt(forest_data_path) # Припустимо, що дані  
    представлені у вигляді числового масиву
```

```
    return forest_data
```

```
# Побудова регресійних моделей
```

```
def build_regression_models(features, target):
```

```
    # Використання узагальнених адитивних моделей (GAMs)
```

```
    model = LinearRegression()
```

```
    model.fit(features, target)
```

```
predictions = model.predict(features)

# Оцінка ефективності моделі
r2 = r2_score(target, predictions)

return model, r2

satellite_image_path = "path/to/satellite_image.jpg"
forest_data_path = "path/to/forest_data.txt"

# Завантаження супутникових знімків
satellite_image = load_satellite_images(satellite_image_path)

# Обробка вхідного зображення
R, NIR, NDVI, Green_NDVI = process_input_image(satellite_image)

# Очищення від викидів
NDVI_cleaned = outlier_removal(NDVI)
Green_NDVI_cleaned = outlier_removal(Green_NDVI)

# Завантаження довідкових даних про лісові насадження
forest_data = load_forest_data(forest_data_path)

# Побудова регресійних моделей
features = np.column_stack((NDVI_cleaned, Green_NDVI_cleaned,
                             forest_data))

target = satellite_image[:, :, 0].flatten() # Припустимо, що відбивна
здатність знаходиться в першому каналі
```

```
model, r2 = build_regression_models(features, target)
```

```
# Завершальный этап
```

```
final_stage()
```