

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ННІ лісового і садово-паркового господарства

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

Андрій БІЛОУС

(підпис)

(ПІБ)

«02» _____ червня 2025 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему «Геопросторовий аналіз видового складу лісів ВП НУБіП
України «Боярська лісова дослідна станція»»**

Спеціальність

205 Лісове господарство

Гарант освітньої програми

к.с.-г.н., доцент

_____ Наталія ПУЗРІНА

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

к.с.-г.н., доцент

_____ Віктор СВИНЧУК

Виконала

_____ Марія МИРОНЮК

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНІ лісового і садово-паркового господарства

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Т.в.о. завідувача кафедри
таксації лісу та лісового менеджменту
д.с.-г.н., проф. _____ Віктор МИРОНЮК**

« 5 » грудня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТЦІ

Миронюк Марії Олександрівні

Спеціальність 205 Лісове господарство

**Тема випускної бакалаврської роботи: «Геопросторовий аналіз видового складу лісів
ВП НУБіП України «Боярська лісова дослідна станція»»**

**затверджена наказом ректора НУБіП України від 22.11.2024 р. №2087 «С»
Термін подання завершеної роботи на кафедрі 2025.06.02**

рік, місяць, число

**Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: Матеріали щодо
характеристики ВП НУБіП України «Боярська лісова дослідна станція», звітні дані про
господарську діяльність, мультиспектральні супутникові знімки, дані вибіркової
інвентаризації лісів за 2018-2019 р.р.**

Перелік питань, які потрібно розробити:

- 1. Огляд сучасних методів ДЗЗ для моніторингу лісів.**
- 2. Методи картографування видового складу лісів.**
- 3. Значення різночасових знімків для картографування деревних видів.**

Дата видачі завдання "5" грудня 2024 р.

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

Віктор СВИНЧУК

Завдання прийняла до виконання

Марія МИРОНЮК

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	8
1.1. Методи інвентаризації лісових ресурсів.....	8
1.2. Особливості національної інвентаризації лісів України.....	11
1.3. Сучасні сенсори дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для моніторингу лісів	13
1.4. Методи поєднання даних наземних і дистанційних спостережень для картографування лісів.....	18
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ	21
2.1. Лісовий фонд ВП НУБіП України «Боярська лісова дослідна станція»	21
2.2. Методика вибіркової інвентаризації	26
2.3. Характеристика інвентаризаційних ділянок	28
РОЗДІЛ 3. ВИДОВИЙ СКЛАД ЛІСІВ ВП НУБіП УКРАЇНИ «БОЯРСЬКА ЛДС» ЗА ДАНИМИ ДЗЗ	32
3.1. Обґрунтування класифікаційної моделі панівних видів.....	32
3.2. Підготовка супутникових знімків до класифікації.....	39
3.3. Створення карти панівних порід	42
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49
ДОДАТКИ.....	53

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота: 53 с., 17 рис., 5 табл., 33 джерела, 1 додаток.

Об'єкт дослідження – лісові насадження ВП НУБіП України «Боярська ЛДС».

Мета роботи – дешифрування видового складу лісів ВП НУБіП України «Боярська ЛДС» за супутниковими знімками Sentinel-2.

У роботі виконано узагальнення методів ДЗЗ для моніторингу та картографування видового складу лісів і обґрунтовано доцільність використання різночасових знімків у поєднанні з даними вибіркової інвентаризації лісів для створення карт панівних порід.

У I розділі бакалаврської роботи наведено узагальнення сучасних методів ДЗЗ для моніторингу лісів, методів картографування їхнього видового складу, особливості національної інвентаризації лісів України.

У II розділі викладено особливості лісорослинних умов, господарської діяльності, характеристика лісового фонду, методика вибіркової інвентаризації лісів, джерела даних супутникової зйомки та способи їх одержання з онлайн-ресурсів постачальників знімків.

У III розділі наведено результати автоматизованої обробки супутникових знімків, встановлено точність класифікації деревних порід за різночасовими супутниковими знімками та створено карти поширення панівних порід в лісових насадженнях ВП НУБіП України «Боярська лісова дослідна станція».

Для написання бакалаврської кваліфікаційної роботи було використано різночасові супутникові знімки, програмне забезпечення R та відповідні статистичні пакети для обробки знімків.

Ключові слова: Sentinel, лісова маска, деревний вид, інвентаризаційна ділянка, матриця помилок.

ВСТУП

Наявність актуальних і точних даних про стан лісів є необхідною передумовою для ефективного управління лісами. Значну роль у вирішенні багатьох питань інформаційної підтримки у сфері збереження, відтворення та обліку лісів відіграють дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Вони дають змогу оперативно одержувати об'єктивну інформацію про стан та динаміку лісового покриву, оцінювати біофізичні параметри лісових екосистем, встановлювати лісівничі й таксаційні показники лісових насаджень, виявляти і попереджати ризики від втрати лісами своїх функцій. Відповідно значення сучасних технологій спостереження за станом земного покриву з космосу в сучасних умовах неупинно зростає.

Переконливим свідченням ефективності використання космічних знімків для практичних і наукових цілей є постійне розширення спектра задач, які вирішуються завдяки результатам обробки космічних знімків. Ефективність застосування даних ДЗЗ залежить від точності дешифрування та достовірності інтерпретації отриманих результатів. Сучасні дані ДЗЗ володіють необхідними технічними характеристиками, що дозволяють вирішувати широкий спектр завдань, космічного моніторингу лісових екосистем [7, 14, 31].

Передумови використання даних ДЗЗ визначаються залежно від специфіки задач, зокрема, використання різночасових знімків дозволяє відстежувати динаміку змін рослинного покриву та виявити площі, де втрачено лісові масиви або відбулося лісовідновлення. Основними параметрами даних космічної зйомки, які є принципово важливими для отримання якісного результату, вважаються просторове і спектральне розрізнення, періодичність зйомки, ширина смуги сканування.

Наявні підходи щодо дешифрування даних ДЗЗ дозволяють поєднувати спектральну інформацію космічних знімків із додатковими наборами геопросторових даних, такими як цифрові моделі рельєфу (ЦМР), глобальні карти земного покриву, лісовпорядні картографічні бази даних. Зазвичай,

використання супутньої інформації забезпечує високу точність і достовірність остаточного результату [9, 23, 29].

Отже, сучасний стан технологій ДЗЗ забезпечує ефективне вирішення широкого кола задач у сфері лісового господарства як на регіональному, так і на загальнодержавному рівнях. У роботі на прикладі окремого підприємства – ВП НУБіП України «Боярська лісова дослідна станція виконано аналіз можливостей сучасних систем ДЗЗ для визначення площі лісових насаджень та її динаміки, а також дешифрування їх породного складу.

Актуальність бакалаврської роботи полягає в необхідності удосконалення методики картографування лісів з використанням даних ДЗЗ. В цьому відношенні досліджено точність класифікації панівних порід, використовуючи мультиспектральні супутникові знімки Sentinel-2. Окремим питанням було визначення способів підвищення точності карт панівних порід за допомогою різночасових супутникових спостережень.

Мета досліджень полягає в дешифруванні видового складу лісів ВП НУБіП України «Боярська ЛДС» за супутниковими знімками Sentinel-2.

Об'єкт дослідження: лісові насадження ВП НУБіП України «Боярська ЛДС».

Предмет дослідження: просторові закономірності поширення панівних порід на території ВП НУБіП України «Боярська ЛДС».

Методологічну основу проведених досліджень склали непараметричні методи класифікації супутникових знімків. Під час збору інформації використано методи лісової інвентаризації. Під час цифрової обробки супутникових знімків використовувалися алгоритм Random Forest (випадковий ліс).

Завдання досліджень полягають у наступному:

- узагальнити сучасні методи ДЗЗ в завданнях моніторингу лісів;
- проаналізувати сучасні системи ДЗЗ для картографування лісових насаджень;

- опрацювати алгоритми в програмному середовищі R для класифікації панівних порід;
- створити карти поширення панівних порід на території ВП НУБіП України «Боярська ЛДС» за матеріалами дешифрування супутникових знімків Sentinel-2.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Методи інвентаризації лісових ресурсів

Національна інвентаризація лісів є сукупністю заходів із отримання кількісної та якісної інформації про стан лісів. Вона проводиться вибірковими методами з використанням даних дистанційного зондування землі (ДЗЗ). Результатом проведення НІЛ є узагальнена інформація про стан земель лісогосподарського призначення у вигляді текстової, табличної та графічної інформації (у тому числі картографічної) [15, 23].

Метою національної інвентаризації лісів є надання регулярно оновлюваної оцінки національних лісових ресурсів, таких як площа лісів, їхній запас та поточний приріст [16, 17]. Залежно від географічного району, деревних видів, кількісного складу й просторової структури лісових насаджень вирізняють певні методи інвентаризації лісових насаджень.

Відомі методи інвентаризації лісових насаджень використовують вибірку на основі проб зі змінним і фіксованим радіусом. Залежно від цілей інвентаризації може використовуватися відбір трансект, тобто, лінійна вибірка [10, 20].

Під час вибору між пробами зі змінним і фіксованим радіусом враховують низку умов. Так, фіксовані ділянки краще застосувати для великих насаджень із низькою мінливістю. У цих ситуаціях, для вибірки відповідного розміру потрібно менше ділянок, ніж у випадку використання вибірки на основі проб зі змінним радіусом. У багатьох насадженнях, особливо в тих, що мають мало підліску, відбирання проб зі змінним радіусом потребує менше часу на ділянку, що дозволяє відібрати більшу їхню кількість. Щоб забезпечити статистично достовірні оцінки в насадженнях з неоднорідною повнотою та різноманіттям деревних порід потрібна більша кількість ділянок [3, 11].

Використання вибірки на основі проб зі змінним радіусом є поширеною в інвентаризації лісів технікою, за якої дерева вибираються та підраховуються на основі їхнього розміру за допомогою призми або повнотоміру. За результатами такого відбору проб можна визначити площу поперечного перерізу, відповідно повноту й видовий склад. Можна оцінити й запас насадження.

Необхідна кількість ділянок визначається складом насадження. Кількість ділянок буде різною навіть для інвентаризації низької інтенсивності. Насадження, яке є відносно однорідним за видовим складом і віком дерев, можна представити меншою кількістю ділянок, однак зі збільшенням мінливості збільшується кількість ділянок, необхідних для надання адекватних оцінок параметрів насадження.

Розташування ділянок повинно бути таким, щоб ділянки найповніше відображали умови насадження. Одним із способів визначення місця розташування ділянок є використання систематичного відбору, який передбачає розробку паралельних ліній на карті з ділянками, рівномірно розташованими вздовж ліній. Використовують такі орієнтації ліній як північ-південь або схід-захід, також можна застосовувати вирівнювання за ухилом схилу. Для визначення місцезнаходження ділянок також можливе використання випадкових відстаней і азимутів [18].

За допомогою клиноподібної призми, направленої на 1,3 м висоти дерева, тобто рівень висоти грудей, визначають дерева, що входять у інвентаризаційну ділянку. За умови одночасного спостереження крізь прилад на стовбур дерева і поверх нього через заломлення променів у призмі частина зображення буде зміщуватися вбік. Якщо зміщення стовбура перекривається, дерево входить в пробу, якщо знаходиться на межі – зараховується як 0,5 або такі дерева враховують через одне. Центром ділянки за цим методом є клиновидна призма.

Кутомір працює за схожим принципом. Дерево не входить у вибірку, якщо стовбур вужчий за сторони обраного коефіцієнта встановленої площі. Бажана кількість дерев на ділянці становить від 5 до 12.

При застосуванні вибірки на основі проб фіксованого радіуса ділянки, як правило, однакового розміру, розташовані по всій території. Ділянки можуть мати будь-яку форму. Зазвичай використовуються кругові проби, які зручно закладати з однієї центральної точки, але прямокутні ділянки також прийнятні. Кількість і розмір ділянок визначається інтенсивністю інвентаризації, мінливістю деревостану та його площею.

Менша кількість ділянок часто є прийнятною в місцях, де існує відносно низька мінливість повноти та складу насаджень. Кількість ділянок разом із розмірами ділянок визначає загальну площу відібраної проби, яка зазвичай виражається у відсотках від площі насадження.

Багато завдань вибіркових досліджень на основі проб зі змінним і фіксованим радіусом ідентичні:

- визначення кількості і розташування центрів ділянок;
- методи визначення граничних дерев;
- основні вимірювання дерев (діаметр, висота тощо).

Основна відмінність між цими двома методами полягає в тому, що вибірка на основі проб фіксованого радіуса вимагає вимірювання розмірів ділянки. Крім того, такі проби можуть бути менш ефективними в молодших насадженнях з великою кількістю малих за розмірами дерев.

Смуговий метод відбору проб – це спосіб вибірки з використанням довгих вузьких ділянок. У смуговому відборі одиниці вибірки являють собою смуги однакової ширини, розташовані на заданій відстані одна від одної. Ширина смуг і відстань між центральною лінією смуг визначають відсоток площі, яка потрапляє до вибірки. Смуги часто використовуються в тропічних лісах, з обмеженою видимістю через густий підлісок, і де використання проб великого розміру неефективне. Смуговий метод часто використовується для інвентаризації поновлення лісу.

1.2. Особливості національної інвентаризації лісів України

Згідно з Постановою Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку проведення національної інвентаризації лісів та внесення зміни у додаток до Положення про набори даних, які підлягають оприлюдненню у формі відкритих даних», інвентаризація лісів проводиться на всій території України в мережі інвентаризаційних ділянок [16].

Національна інвентаризація лісів (НІЛ) проводиться щорічно на території всієї країни за методом стратифікованої вибірки. При цьому згідно з планом вибіркового обстеження визначається кількість пробних інвентаризаційних ділянок, що підлягають щорічному обстеженню протягом п'ятирічного циклу збору польових даних.

Основним типом вибірки, що використовує національна інвентаризація, є подвійна стратифікована вибірка. Вона передбачає поділ генеральної сукупності на страти відомого розміру. Під час стратифікації обов'язково виділяють страти лісових та нелісових земель [5].

Інвентаризаційні ділянки є одиницями вибірково-статистичного обстеження, які за формою та розміром є однаковими для мережі інвентаризаційних ділянок. Для проектування мережі інвентаризаційних ділянок територія України розбивається на квадрати розміром 5000х5000 метрів, у кожному з яких у випадковому порядку розміщується один інвентаризаційний тракт з урахуванням смуги завширшки 250 метрів за периметром квадратів, у якій не можуть бути розміщені інвентаризаційні ділянки.

Для сформованої мережі інвентаризаційних ділянок встановлюються географічні координати їх центрів.

З метою створення системи вибірково-статистичних обстежень інвентаризаційні ділянки відносять до певного року обстеження. Повторні обстеження в наступному циклі проводяться зі збереженням встановленої черговості обстежень за роками.

В Україні національну інвентаризації лісів запроваджено в 2021 році. До цього виконувалися окремі регіональні та локальні дослідження [6, 10, 29]. Інвентаризаційні ділянки розподіляються рівномірно, але випадковим чином по всій площі інвентаризації. Для цього територію інвентаризації необхідно поділити на інвентаризаційні квадрати зі стороною 4950 м з випадково розміщеною інвентаризаційною ділянкою всередині [17, 18]. За планом інвентаризації щороку в систематичному порядку 20% ділянок мають бути інвентаризовані. Однак, при цьому виникають великі відстані між ділянками (приблизно 25 км найкоротша відстань між точками), оскільки чотири інвентаризаційні квадрати “пропускаються” [15, 16].

Пробні ділянки НІЛ в Україні були зібрані в період між 2020 та 2023 роками з використанням загальнонаціональної схеми розподілу пробних ділянок. За цей період було виміряно близько 3000 пробних площ по всій Україні. Даний підхід передбачає випадковий розподіл кластерів пробних ділянок у межах систематичної опорної сітки розміром 5×5 км, у кожному з яких у випадковому порядку розміщується один інвентаризаційний тракт з урахуванням смуги завширшки 250 метрів за периметром квадратів, у якій не можуть бути розміщені інвентаризаційні ділянки. Інвентаризаційні ділянки складаються з основної ділянки у формі круга площею 500 кв. метрів і радіусом 12,62 метра в горизонтальній проекції та трьох додаткових підділянок за принципом концентричних кругів, центри яких збігаються з центром основної ділянки, зокрема підділянка 1 площею 250 кв. метрів і радіусом 8,92 метра, підділянка 2 площею 50 кв. метрів і радіусом 3,98 метра, підділянка 3 площею 10 кв. метрів і радіусом 1,78 метра, а також двох кругових мікроділянок площею 1 кв. метр і радіусом 0,56 метра, центри яких винесені на відстань 3 метри в північному та південному напрямках від центру основної ділянки [15, 16].

Кожна вибіркова ділянка обов'язково характеризувалася географічними координатами центрів ділянок, набором атрибутів, пов'язаних з адміністративним регіоном, екозоною, лісорослинними умовами та індексом ділянки. Виміряні, а також розраховані лісові змінні включали середній вік

домінуючої деревної породи, середній діаметр на висоті грудей (DBH) та висоту домінуючої деревної породи; загальну густоту деревостану (кількість дерев), продуктивність деревостану та загальний запас; абсолютні та пропорційні оцінки продуктивності для кожної породи [5].

Для управління та збору даних у лісі під час НІЛ України використовувалися програмні продукти, що дозволили за допомогою базової карти здійснювати моніторинг етапів виконання польових робі, а також побудувати маршрут до потрібної інвентаризаційної ділянки, швидке знаходження альтернативних шляхів та орієнтування на місцевості [1].

Для проведення Національної інвентаризації лісів (НІЛ) в Україні використовується програмне забезпечення Small Forest, розроблене на основі операційної системи Android та мобільної геоінформаційної системи (ГІС) Field-Map. Small Forest дозволяє польовим бригадам збирати дані на ділянках НІЛ. Крім того, Україна також розглядає можливість використання програми Open Foris для покращення процесу НІЛ [5].

1.3. Сучасні сенсори дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для моніторингу лісів

Достовірна інформація про фактичний географічний розподіл лісового покриву, біофізичні параметри та продуктивність лісових насаджень дозволяє встановити динаміку земного покриву. Однак інформація про лісові ресурси швидко застаріває внаслідок господарської діяльності, природного впливу середовища, антропогенного навантаження [9, 10].

Використання даних дистанційного зондування землі для класифікації лісового покриву розширило уявлення про стан і динаміку лісів. Ще донедавна дослідження були зосереджені на традиційних методах інтерпретації аерофотознімків, проте нині функціонує низка систем супутникового

моніторингу, які забезпечують періодичну зйомку значної частини земної поверхні та необхідну детальність знімків [13, 22]

1.3.1. Система Landsat. Landsat – це орбітальна супутникова система, яка отримує багатоспектральні дані про земну поверхню на постійній основі та має найдовший безперервний глобальний запис поверхні Землі [27]. Вже понад 40 років програма Landsat збирає спектральну інформацію з поверхні Землі, створюючи історичний архів, який не має собі рівних за якістю, деталізацією, охопленням та обсягом [26].

Програма Landsat складається з серії супутникових місій зі спостереження Землі, якими спільно керують НАСА та Геологічна служба США (USGS). Landsat-1 (до 1975 року Earth Resource Technology Satellite (ERTS)) був запущений 23 липня 1972 року і став першим супутником, місією якого стало отримання безперервних багатоспектральних даних про ресурси Землі. Після відкриття в 2008 році доступу до багаторічного архіву знімків, відбулося багато вдосконалень методики їхньої обробки [11, 27]

11 лютого 2013 року з авіабази Ванденберг, штат Каліфорнія, ракетою носієм Atlas-V 401 відбувся запуск Landsat-8. Він оснащений двома сенсорами – оперативним тепловізором (OLI) і тепловим інфрачервоним датчиком (TIRS). Завдяки ним забезпечується сезонне покриття поверхні Землі з просторовою роздільною здатністю в 30 метрів (RGB, NIR, SWIR), 100 метрів (тепловий) і 15 метрів (панхроматичний).

Landsat 8 регулярно отримує 725 знімків на день, тоді як Landsat 7 – лише 438 знімків. Це допомагає збільшити ймовірність отримання безхмарних знімків земної поверхні та надає більше можливостей для обробки даних.

Розмір знімка Landsat 8 становить 185 км впоперек треку на 180 км вздовж треку. Періодичність збору даних системою в конкретній точці становить 16 днів. Спектральне розрізнення рівне 12 каналам. Номінальна висота космічного апарату – 705 км [26].

1.3.2. Система Sentinel. Європейське космічне агентство (ESA) розробляє нове сімейство місій під назвою Sentinels спеціально для оперативних потреб

Copernicus. Кожна місія Sentinel базується на сузір'ї супутників для виконання вимог щодо повторного відвідування та покриття, надаючи надійні набори даних для служб Copernicus [33].

Sentinel-1 – це місія з полярною орбітою, сфера вимірювань якого охоплює ландшафтну топографію, багатоцільові зображення (суша), багатоцільові зображення (океан), вітри поверхні океану, топографію й течії океану, висоту та спектр океанських хвиль, морський льодовий покрив, край та товщину, сніговий покрив, край та глибину, вологість ґрунту та рослинність. Sentinel-1A був запущений 3 квітня 2014 року, а Sentinel-1B – 25 квітня 2016 року, місія якого завершилася у 2022 році.

Sentinel-2 – це полярно-орбітальна мультиспектральна місія з високою роздільною здатністю для моніторингу земель. Надає зображення рослинного й водного покриву, ґрунту, внутрішніх водних шляхів та прибережних районів. Sentinel-2A був запущений 23 червня 2015 року, а Sentinel-2B – 7 березня 2017 року.

Sentinel-3 підтримує системи прогнозування океану, а також моніторинг навколишнього середовища та клімату. Sentinel-3A був запущений 16 лютого 2016 року, а Sentinel-3B приєднався до нього 25 квітня 2018 року.

Sentinel-4 та Sentinel-5 є корисними навантаженнями, призначені для моніторингу атмосфери та її спостереженням. Перший було запущено на супутнику Meteosat третього покоління, а другий на борту супутника MetOp другого покоління.

Sentinel-6 оснащений радіолокаційним висотоміром для вимірювання глобальної висоти поверхні моря, в першу чергу для оперативної океанографії та кліматичних досліджень [33].

Управління земельними ресурсами, зокрема облік лісових земель та їх картографування, виконується за допомогою місії Sentinel-2. Два супутники системи летять летять на одній орбіті, але з фазою на 180° , на сонячно-синхронній орбіті на середній висоті 786 км.

Кожен із супутників у місії Sentinel-2 несе єдине корисне навантаження. Оптичний мультиспектральний прилад (MSI) відбирає зразки 13 спектральних діапазонів: чотири смуги на 10 м, шість смуг на 20 м і три смуги з просторовою роздільною здатністю 60 м. Вони варіюються від видимого та ближнього інфрачервоного (VNIR) до короткохвильового інфрачервоного діапазону (SWIR). Ширина орбітального валу становить 290 км. Темпоральне розрізнення Sentinel-2 становить 2-3 дня. Радіометрична роздільна здатність приладу становить 12 біт. Просторове розрізнення – 10-60 м [24, 33].

1.3.3. Система PlanetScore. Супутникове угруповання PlanetScore складається з багаторазових запусків груп окремих кубсатів (Doves і SuperDoves). У 2017 році флот Dove досяг майже щоденного охоплення мультиспектральними зображеннями по всіх масивах суші, що ознаменувало завершення місії Planet 1. З моменту завершення цієї місії Planet підтримує та поповнює флот Dove за рахунок регулярних спусків нових угруповань супутників кілька разів на рік, який нараховує на даний момент більше 430 супутників.

В основі конструкції супутників Dove лежить форм-фактор CubeSat 3U, розміри якого становлять 10 см × 10 см × 30 см. Всі нові супутники запускаються на сонячно-синхронну орбіту з висотою орбіти 475-525 кілометрів з нахилом 98°. Оригінальний дизайн сузір'я Dove відповідає червоному, зеленому, синьому та ближньому інфрачервоним спектральним діапазнам. До серпня 2021 року Planet оновила сузір'я, замінивши оригінальні супутники Dove на SuperDoves наступного покоління, які вже представили чотири додаткові спектральні діапазони – зелений I, червоний край, жовтий і прибережний синій [32].

Варто відзначити, що не зважаючи на те, що супутники мають назву «Doves», зображення, які вони роблять, мають бренд PlanetScore.

Існує 3 типи датчика:

Dove-C – камера з трьома смугами кадру або чотирисмуговий тепловізор з розділеним кадровим NIR-фільтром;

Dove-R – чотиризмугова камера з фільтром “м’ясний блок”, що забезпечує сині, зелені, червоні та NIR смуги;

SuperDove – восьмисмуговий камерний тепловізор з фільтром «м’ясний блок», що забезпечує сині, зелені, червоні, червоні та NIR смуги.

Продукт PlanetScore Scene – це окрема кадрова сцена в межах смуги, знята супутником під час безперервного лінійного сканування Землі. Сцени всередині смуги накладаються один на одного і не організовані за певною системою мозаїчної сітки.

Розміри продуктів PlanetScore Scene становлять приблизно від 280 до 630 квадратних кілометрів, залежно від того, який тип інструменту їх зняв. Вони представлені у Платформі Planet як типи об’єктів PSScene, що підтримує доступ до 8-діапазонних зображень (RGB, NIR, червоний край, жовтий, зелений I і прибережний синій). Радіометричне та темпоральне розрізнення відповідно становлять 16 біт та менше 1 дня [32].

1.3.4. Система MODIS. Спектрорадіометр помірної роздільної здатності (MODIS) – це датчик, що працює на супутниках Terra та Aqua, які були запущені NASA у грудні 1999 року та травні 2002 року відповідно. Terra MODIS і Aqua MODIS оглядають всю поверхню Землі кожні 1-2 дні, мають ширину смуги огляду 2330 км, отримуючи дані в 36 спектральних діапазонах з довжиною хвилі від 0,4 до 14,385 мкм. Зображення MODIS мають просторову роздільну здатність 250 м, 500 м і 1 км.

MODIS ідеально підходить для моніторингу великомасштабних змін у біосфері, які дають нові знання про функціонування глобального вуглецевого циклу. Для цього він вимірює фотосинтетичну активність наземних і морських рослин, щоб мати дані продуктивності рослин у процесі життєдіяльності.

Майже щодня по всій земній кулі датчик відстежує зміни на поверхні Землі. MODIS фіксує стихійні лиха – виверження вулканів, повені, сильні шторми, посухи і лісові пожежі. Діапазони MODIS особливо чутливі до пожеж. Вони можуть відрізнити полум’я від тліючих опіків і надають кращі оцінки кількості аерозолів і газів, які пожежі викидають в атмосферу [28].

1.4. Методи поєднання даних наземних і дистанційних спостережень для картографування лісів

Картографування лісів із використанням лише одного типу даних, які включають або наземні вимірювання або дистанційне зондування часто має свої обмеження. Наземні вимірювання дають точну інформацію про певні ділянки, але такі операції на великих територіях є дуже витратним та трудомістким. Дистанційне зондування ж дозволяє охопити великі території, однак отримані таким способом дані потребують верифікації та калібрування за допомогою наземних даних для отримання точних кількісних оцінок. Саме тому, ефективно поєднання цих двох типів даних дозволяє отримати більш точні, актуальні та детальні карти лісів, а також покращити процеси інвентаризації та моніторингу.

Одним із поширених підходів є використання наземних даних з пробних ділянок для навчальних або валідаційних даних задля подальшої класифікації та моделювання на основі даних дистанційного зондування. Це дозволяє «навчити» алгоритми розпізнавати різні типи лісового покриву, їхні характеристики (наприклад, породний склад, повноту, висоту) за спектральними, структурними або іншими ознаками, отриманими з супутникових чи аерознімків або даних LiDAR.

В дослідженнях українських науковців та навчальних матеріалах також зазначено про можливість об'єднання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та польових вимірювань для інвентаризації лісів [30, 9]. Так, обговорюється застосування часових рядів супутникових знімків (таких як Landsat і Sentinel-2) у поєднанні з історичними даними лісовпорядкування для підвищення точності оцінок. Серед методів, що використовуються для цього, згадуються метод найближчих сусідів (k-NN) для картографування та прогнозування таксаційних показників [2, 9]. Також підкреслюється роль поєднання вибіркової інвентаризації лісів з даними ДЗЗ для отримання статистичних оцінок та тематичного картографування.

Першою, ідея так званої «багатоджерельної» інвентаризація лісів (MS-NFI) була реалізована під час інвентаризації лісів у Фінляндії в 1990 р. Вона поєднувала інвентаризаційні ділянки, супутникові знімки, цифрові карти землекористування та кліматичні моделі для створення лісових карт і обліку лісових насаджень на національному рівні [8, 20].

Міжнародний досвід демонструє ефективність інтеграції даних. Наприклад, для оцінки стану лісів на основі спільної статистичної обробки даних наземних пробних ділянок та супутникових знімків Sentinel-2В використовується метод k-NN [25]. Дослідження показують, що поєднання ДДЗ та польових даних, дозволяє отримати більш точні та неупереджені оцінки лісових параметрів на великих територіях [30].

Багато карт, які використовуються в лісоуправлінні, неможливо розробити без використання наземних досліджень. Це стосується карт стовбурового запасу лісових насаджень, середніх діаметра, висоти, віку тощо. Також без наземних досліджень неможливо опрацювати карти видового складу лісових насаджень. У дослідженні Blickensdörfer et al. (2024) продемонстровано ефективність створення карт поширення деревних видів на території Німеччини за допомогою даних національної інвентаризації та супутникових знімків Sentinel 2 і Sentinel 1 [19]. В сучасній літературі існує багато прикладів успішного поєднання наземних і дистанційних вимірювань лісових насаджень для створення точних карт деревних порід [21, 24, 25, 31]

Активно застосовуються дані повітряного лазерного сканування та аерофотознімки, які в поєднанні з наземними вимірюваннями дозволяють оцінювати характеристики окремих дерев та деревостанів. Інтеграція цих даних в лісову інвентаризацію є перспективним напрямом, що дозволяє підвищити точність оцінок, особливо для лісів зі складною структурою [1, 30].

Отже, основні методи поєднання наземних і дистанційних спостережень для картографування лісів дають можливість значно покращити ефективність та точність картографування лісів, що є надзвичайно важливим для сталого управління лісовими ресурсами та моніторингу їхнього стану.

Висновки до розділу 1.

1. Вибіркова інвентаризація лісів є надійним джерелом даних про лісові ресурси.
2. Сучасні системи супутникового моніторингу можуть поєднуватися із показниками, одержаними на інвентаризаційних ділянках, забезпечуючи систематичне оновлення лісових карт.
3. Супутникові знімки Sentinel 2 є ефективним джерелом безкоштовних даних про стан і динаміку лісових насаджень.

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Лісовий фонд ВП НУБіП України «Боярська лісова дослідна станція»

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Боярська лісова дослідна станція» розташований в центральній частині Київської області на території Фастівського та Обухівського адміністративних районів та Голосіївського району м. Києва. Це сучасне комплексне державне підприємство, яке виконує виробничу, навчально-наукову діяльність, є основною базою для проведення навчальних та виробничих практик, а також є об'єктом постійних наукових досліджень і активно впроваджує у практику досягнення лісівничої науки.

Площа лісових масивів ВП НУБіП України «Боярська ЛДС» складає 2,4% площі лісового фонду Київської області. Структура відокремленого підрозділу складається з двох лісництв – Боярського загальною площею 9846 га, що складає 55% від всього запасу, і Плесецького площею 7989 га, що рівне 45%. Лісництва також розподілені на 10 лісових ділянок, середня площа кожної становить – 892 га.

Починаючи з 1998 року на всій території ВП НУБіП України «Боярська ЛДС» проводилося безперервне лісовпорядкування. Нинішнє базове лісовпорядкування проведено 2017 року Комплексною лісовпорядною експедицією за I розрядом у відповідності з вимогами чинної лісовпорядної інструкції, рішеннями першої лісовпорядної наради і технічної наради за підсумками польових робіт. За матеріалами базового лісовпорядкування площа ВП НУБіП України «Боярська ЛДС» становить 17 835 га, з яких 92,4 % (16161,5 га) – вкриті лісовою рослинністю лісові ділянки. Лісистість у районі діяльності ВП НУБіП України «Боярська ЛДС» – складає 22,5 %.

Лісовпорядкування на підприємстві проведено за методом класів віку. Він полягає в утворенні госпчастин, господарств, господарських секцій, які складаються з сукупності однорідних за складом і продуктивністю деревостанів, об'єднаних одним віком і способом рубки лісу. Первинною обліковою одиницею є таксаційний виділ, а первинною розрахунковою одиницею – господарська секція. Усі розрахунки здійснені на основі підсумків розподілу площ і запасів насаджень господарських секцій за класами віку.

У лісовому фонді ВП НУБіП України «Боярська ЛДС» переважають насадження сосни звичайної (*Pinus sylvestris L.*) – 81,6 %, дуба звичайного (*Quercus robur L.*) – 13,5 %, вільхи клейкої (*Alnus glutinosa (L.) Gaerth.*) – 2,0 %, від площі вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок. Решту складають граб звичайний (*Carpinus betulus L.*), береза повисла (*Betula pendula Roth.*), дуб червоний (*Quercus rubra L.*) та інші деревні види (рис. 2.1).

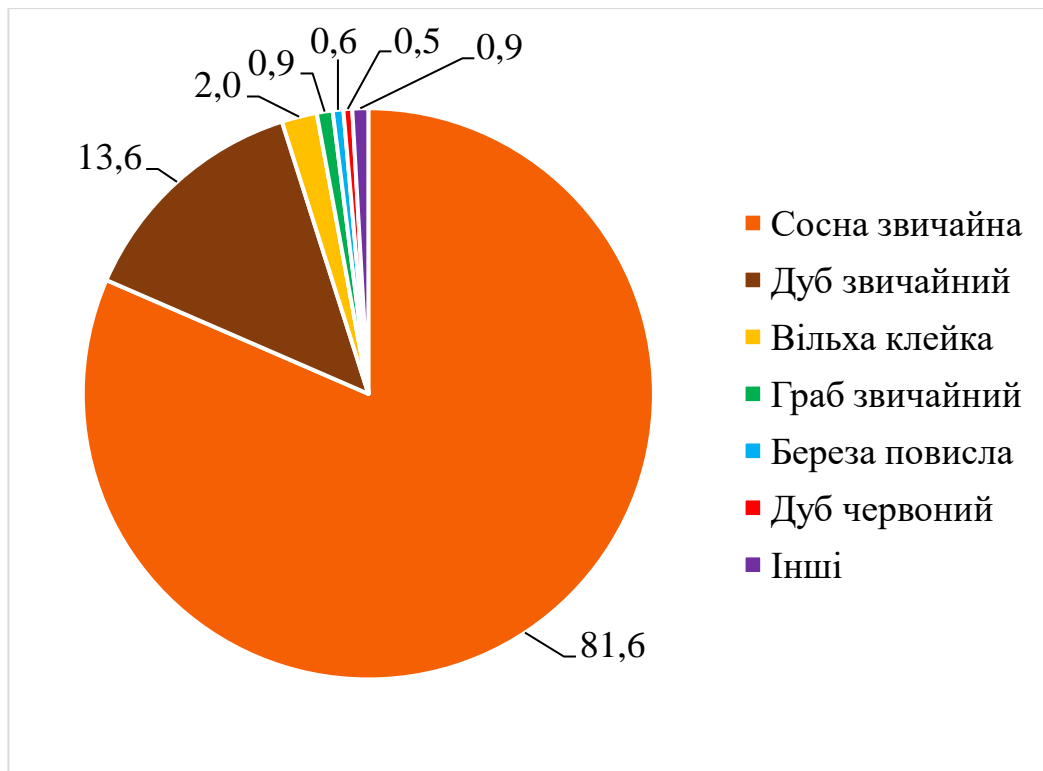


Рис. 2.1. Розподіл площі вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок за переважаючими деревними видами, %

Відповідно до розподілу площі лісових ділянок на групи віку у Боярській лісовій дослідній станції переважають середньовікові насадження, які становлять 51,3 % від загальної площі. Стигли та перестиглі насадження займають 9,0 %. Детальний розподіл площі вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок за групами віку відображено на рисунку 2.2.

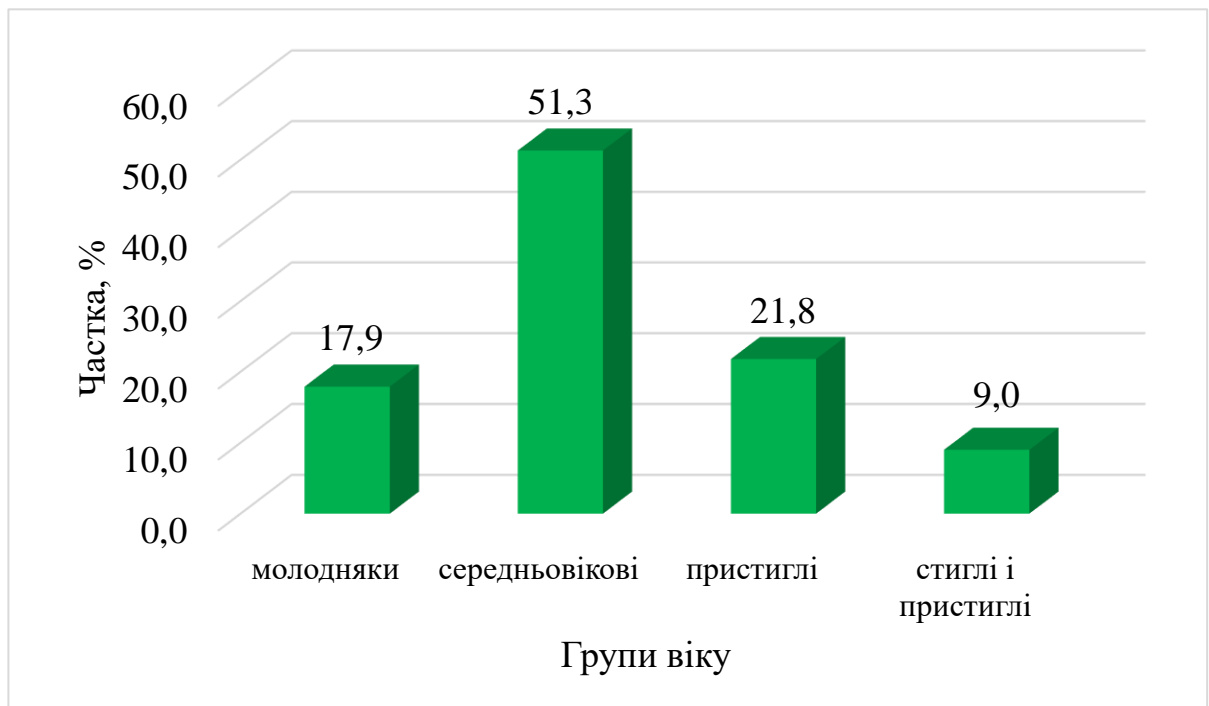


Рис. 2.2. Розподіл площі вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок за групами віку, %

Насадження Боярської лісової дослідної станції високопродуктивні, оскільки частка I і вищих класів бонітету становить 85,5 % від загальної площі вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок. Розподіл площі вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок за продуктивністю наведено на рис. 2.3.

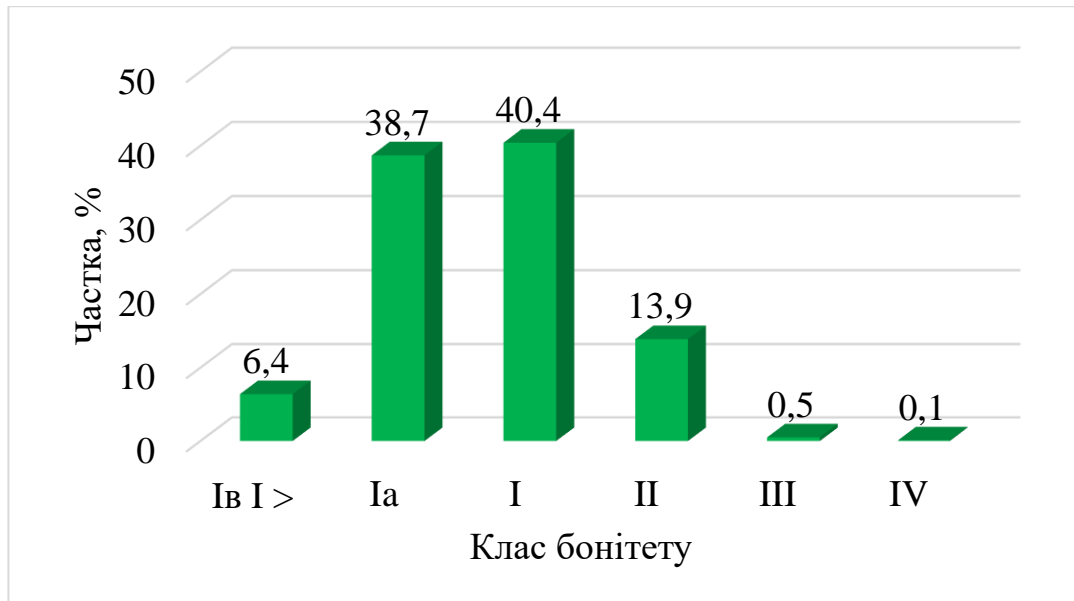


Рис. 2.3. Розподіл площі вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок за класами бонітету, %

Наступним найбільш важливим показником деревостанів є його повнота. Як видно з рис. 2.4, у ВП НУБіП України «Боярська ЛДС» переважають насадження з відносною повнотою 0,7 (35,5%) та 0,6 (30,5%).

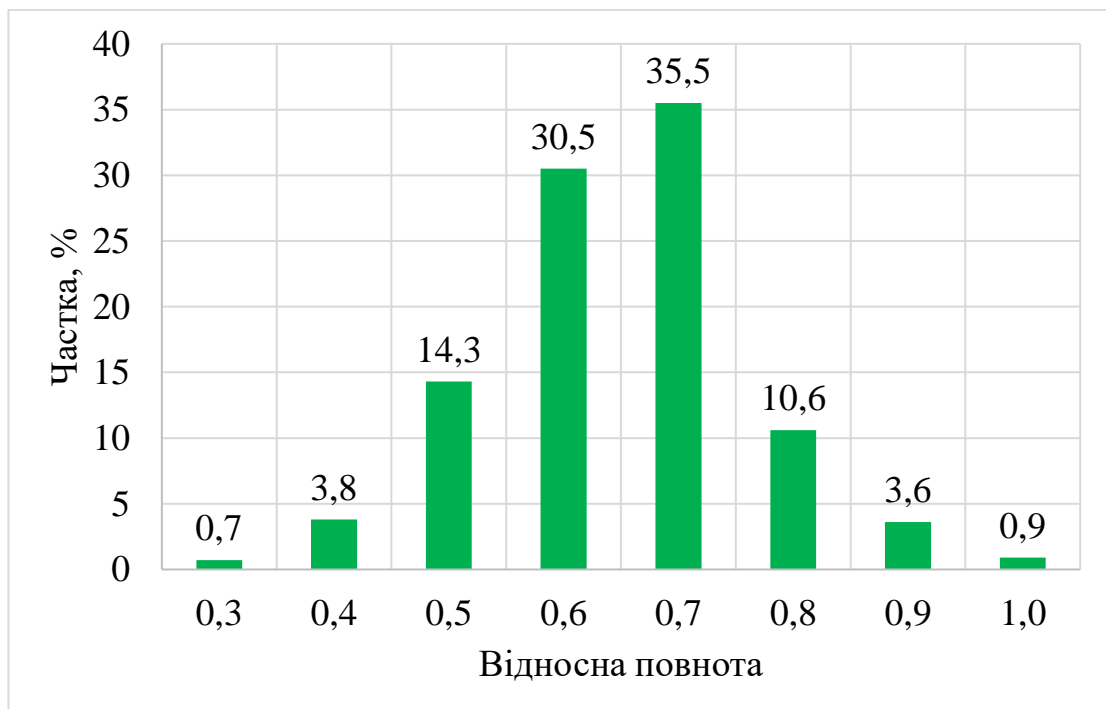


Рис. 2.4. Розподіл площі вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок за відносною повнотою, %

У цілому по підприємству лісові насадження в середньому мають склад 9Сз1Дз, середній вік – 74 роки, середній клас бонітету I^a і середню повноту – 0,63. Понад 98 % площі вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок займають свіжі судіброви (74,3%) і субори (24,5%). Зважаючи на те, що свіжі судібровні та суборові умови є найбільш сприятливими для росту високопродуктивних насаджень сосни звичайної, лісовий фонд підприємства переважно представлений насадженнями сосни звичайної у першому ярусі й домішкою дуба звичайного – в другому.

У загальній площі лісового фонду ВП НУБіП України «Боярська ЛДС» 98,1% становлять лісові ділянки. Їх розподіл за категоріями наведений на рис. 2.5.

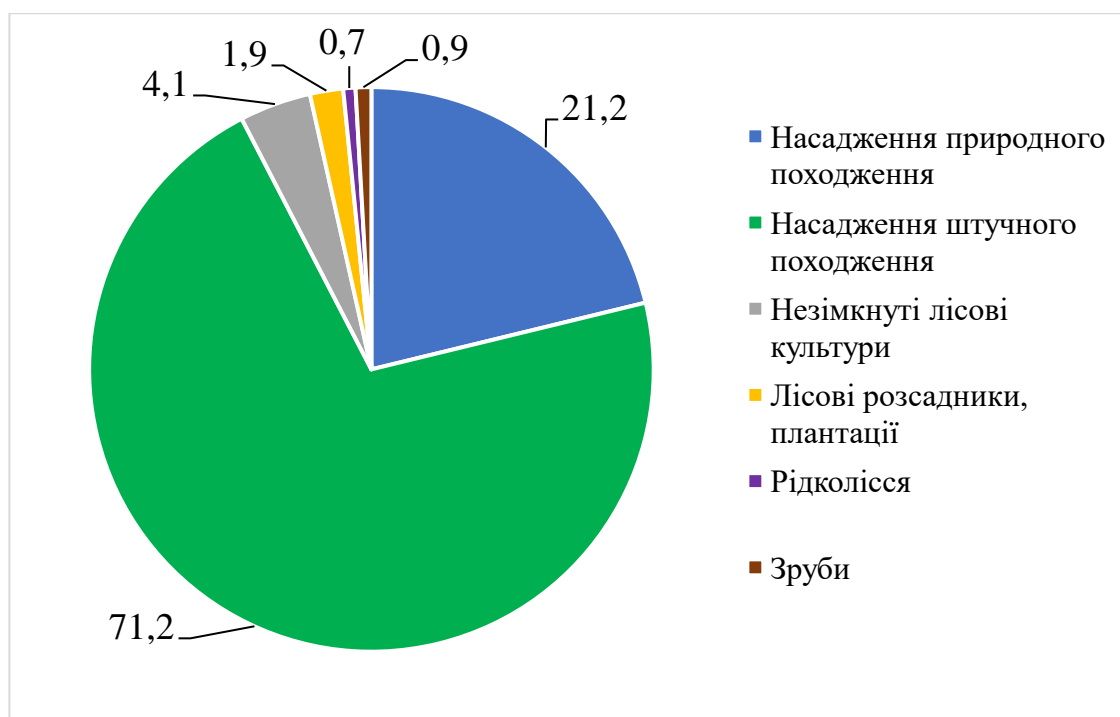


Рис. 2.5. Розподіл площі лісових земель за категоріями, %

Лісовпорядні роботи проводилися згідно з правилами, прописаними у Лісовому кодексі України, Законі України «Про охорону навколишнього природного середовища», інших законодавчих та нормативно-правових актах України, протоколу першої лісовпорядної наради.

Таксація лісового фонду здійснювалась окомірною-вимірювальним методом. Даний метод оснований на поєднанні окомірної таксації з вибірковою вимірювальною і переліковою таксацією, дані якої є основою для таксаційної характеристики виділу. Для коригування запасів насаджень на 1 га під час окомірної таксації, а також визначення відносних повнот під час вибіркової вимірювальної і перелікової таксації використовувалися таблиці «Сум площ перерізів та запасів деревостанів при повноті 1,0», розміщених у «Лісотаксаційному довіднику» (2021).

2.2. Методика вибіркової інвентаризації

Щоб отримати повні та достовірні дані для забезпечення сталого лісокористування, раціонального й ефективного використання лісових ресурсів, необов'язково проводити суцільні вимірювання і витратити значні суми коштів, багато часу та кваліфікованих працівників. Надійна і репрезентативна інформація стану лісових ресурсів може бути отримана методами вибіркової лісоінвентаризації. Вона ґрунтується на застосуванні математико-статистичних, науково-обґрунтованих методів планування вибірки, де наперед можна встановити необхідну точність і достовірність результатів при певному рівні ймовірності, виходячи з обсягу вибірки, величини та кількості облікових одиниць, витрат тощо, тобто створити модель збору інформації [2].

Основні принципи проведення вибіркової інвентаризації лісів передбачають закладання сітки пробних площадок за певною схемою розташування, яка повинна бути статистично репрезентативною для лісового фонду [5, 16].

На сучасному етапі розвитку, більшість країн отримують інформацію про лісосировинні ресурси шляхом проведення національної інвентаризації (НІЛ) [19, 15]. Загалом, це система регулярних вибіркового обстежень для отримання статистично обґрунтованої інформації про кількісні та якісні показники стану і

динаміки лісів держави, їх ресурсного потенціалу для потреб державного управління, стратегічного планування ведення лісового господарства, державного лісового кадастру, моніторингу довкілля, міжнародної звітності про ліси [16].

З 2018 року на базі фонду Боярської ЛДС, за ініціативи науковців кафедри таксації лісу та лісового менеджменту, було розпочато дослідження з інвентаризації лісів, у ході якого заклали 200 кругових пробних площ. Кожна така пробна площа являє собою круг площею 500 м² та радіусом 12,62 м.

Для її закладання використовувалася польова геоінформаційна система FieldMap. Так, кругові пробні площі постійного радіуса широко застосовуються в лісовій інвентаризації.

На кожній пробі проводиться таксація деревостану, під час яких виконуються такі роботи:

- визначення деревного виду для кожного дерева;
- вимірювання діаметра і висоти облікових дерев;
- картографування позиції облікових дерев в системі FieldMap;
- таксаційний опис лісового насадження;
- визначення ознак, які вказують на походження дерева і його конкурентну ситуацію;
- збір ознак, які мають значення для біорізноманіття, тобто структура біотопів.

Всі польові дослідження виконувалися на основі запроектованої мережі пробних площ. Характеристика експериментального полігону складається відповідно до матеріалів таксації лісових насаджень на вибіркових одиницях.

Кожній ділянці було створено карту з відповідною геолокацією, а кожне дерево позначено у вигляді точки у програмному забезпеченні FieldMap. За допомогою даного програмного забезпечення можна точно знайти розміщення дерева, тобто точки на території та в межах кругової пробної площі. Для всіх облікових дерев були виміряні діаметри на висоті 1,3 м. Також випадково

відбиралися модельні дерева з числа облікових різних класів діаметра, що становило приблизно $1/4$ від загальної кількості, для яких додатково вимірювалася висота стовбура та встановлювався деревний вид.

Під час досліджень у Боярській ЛДС було обліковано понад 3400 дерев. Для більш точних результатів досліджень використовувались додатково дані окомірної таксації. Під час неї обліковувались дерева вздовж автомобільних шляхів та в місцях, де закладання пробної площі було неможливим. На основі таблиць ходу росту та отриманих даних окомірної таксації визначались суми площ поперечних перерізів.

Варто також відзначити, що окрім даних, отриманих при наземній таксації, використовувались дані дистанційного зондування Землі. Для цього дослідження використано чотириканальні супутникові знімки PlanetScore.

Основним результатом прогнозування показників лісового фонду є растрові карти. На них відображаються розподіл сум площ і деревних запасів лісових насаджень. Саме вони створюють основу для розрахунку середніх і загальних значень цих показників за елементами лісу. В першу чергу, попиксельна оцінка сум площ перерізів дерев кожного деревного виду дозволяє спрогнозувати орієнтовний склад лісових насаджень і визначити головну породу. Так, відповідно до одержаних результатів значення цього показника на рівні окремого пікселя коливається в діапазоні від 75 до 800 м³/га [4].

2.3. Характеристика інвентаризаційних ділянок

Кругові пробні площі (КПП) на території ВП НУБіП Боярська ЛДС закладалися на основі вибіркової-статистичної інвентаризації лісів для використання в подальшому у прогнозуванні та картографуванні таксаційних показників у лісових масивах. Загальна схема розміщення інвентаризаційних ділянок зображена на рис. 2.6.



Рисунок 2.6. Територіальна схема розміщення кругових пробних площ у межах досліджуваного полігону

Під час дослідження було опрацьовано 183 КПП. Серед них 171 пробна ділянка має площу 0,05 га, 6 КПП з площею 0,03 га, 2 КПП – 0,07 га, 1 КПП – 0,09 га, 2 КПП – 0,1 га та 1 КПП – 0,15 га. Використання інших розмірів було обумовлене характеристикою лісових ділянок у місцях закладання досліді.

Згідно з розподілом деревних видів на кругових пробних площах, наведеному в табл. 2.1, найбільш поширеною групою деревних видів є хвойні. Кількість спостережень даної групи значно перевищують у групах твердолистяних і листяних порід. Така незбалансована вибірка, коли є недостатня кількість даних в певних класах, може призводити до подальших помилок у обчисленнях і хибних даних. Однак, насправді на практиці дуже важко отримати дійсно задовільні співвідношення у розмірах ввідних даних. Тому варто пам'ятати про критичний мінімум вибірки.

Таблиця 2.1.

Розподіл деревних видів за групами порід на КПП

Деревний вид	М'яколистяні		Твердолистяні		Хвойні		Загальний код групи деревних порід	Загальна кількість проб
	Код групи деревних порід	Кількість проб	Код групи деревних порід	Кількість проб	Код групи деревних порід	Кількість проб		
Ялиця біла					1	1	1	1
Сосна звичайна					1	131	1	131
Клен польовий			2	1			2	1
Дуб звичайний			2	18			2	18
Робінія псевдоакація			2	1			2	1
В'яз гладенький	3	1					3	1
Тополя тремтяча	3	3					3	3
Береза повисла	3	27					3	27
Всього	3	31	2	20	1	132	1	183

Коли ми говоримо про деревостан, обов'язково наголошуємо на головній породі та згадуємо супутні – це основні складові лісового насадження. На пробних площах Боярської ЛДС переважаючим головним деревним видом є сосна звичайна. Основними супутніми породами у складі її насаджень за запасом виступають дуб звичайний, береза повисла, дуб червоний. Головною породою також виступає і береза повисла з такими супутніми породами: дуб звичайний, сосна звичайна, осика. Не менш важливим головним деревним видом виступає дуб звичайний. У складі його насаджень найбільшу частку становлять такі супутні деревні види: сосна звичайна, береза повисла, в'яз гладенький.

Найпоширенішим типом лісорослинних умов, в місцях закладання пробних площ, який зустрічається на досліджуваному полігоні, є свіжий грабово-дубово-сосновий сугруд 77 % (С₂ГДС). Наступним за поширенням типом лісорослинних умов є свіжий субір та свіжий дубово-сосновий субір, на

які припадає 22 %. Загалом, деревостани із домінуванням сосни звичайної становлять близько 88 % пробних площ від загальної кількості, дуба звичайного – 9 %, інших деревних видів – 3 %.

За віковою структурою панівних деревних видів на досліджуваних інвентаризаційних ділянках переважаючим класом віку для сосни звичайної є VII та IX класи віку. Також, присутня значна частка дерев у VIII, X, XI класах. Для дуба звичайного переважаючим класом віку є IX і VIII. Варто відзначити, що дані для I та II класів віку були відсутні або обмежені через значну густоту самих насаджень і неможливість проведення вимірювань.

Висновки до розділу 2.

1. Експериментальні дослідження на території ВП НУБіП «Боярська ЛДС» щодо інвентаризації лісів вибірковими методами створюють основу для перевірки ефективності дистанційного моніторингу лісів.

2. Використання ретроспективних даних відбору проб потребує залучення часових рядів супутникових знімків.

РОЗДІЛ 3. ВИДОВИЙ СКЛАД ЛІСІВ ВП НУБІП УКРАЇНИ «БОЯРСЬКА ЛДС» ЗА ДАНИМИ ДЗЗ

3.1. Обґрунтування класифікаційної моделі панівних видів

Характеристики лісових насаджень на інвентаризаційних ділянках були поєднані зі спектральними змінними супутникових знімків Sentinel 2. В бакалаврській роботі використано інформацію про фенологію рослинного покриву, в зв'язку з цими залучено три супутникових знімки, які характеризують стан лісових насаджень на початок (травень), середину (липень) і кінець (жовтень) сезону вегетації. Структура вихідного масиву даних наведена в додатку А.

Для визначення впливу фенологічного аспекту на якість карт деревних видів досліджували точність картографування на основі: 1) всього набору спектральних каналів; 2) спектральних каналів знімків для відповідного сезону. Таким чином в бакалаврській роботі сформовано чотири вихідних наборів даних для класифікації.

```
dataAll <- data[,c(6:41,43)] %>% mutate(X_spgr_code = as.factor(X_spgr_code))
dataJuly <- data[,c(6:17,43)] %>% mutate(X_spgr_code = as.factor(X_spgr_code))
dataMay <- data[,c(18:29,43)] %>% mutate(X_spgr_code = as.factor(X_spgr_code))
dataOct <- data[,c(30:41,43)] %>% mutate(X_spgr_code = as.factor(X_spgr_code))
```

Класифікація панівних порід здійснюється на основі класифікаційної моделі. Зважаючи на успішний досвід вирішення цього питання в минулому, перевагу надано широко поширеній моделі Random Forest (випадковий ліс). Будь-яка класифікація має певний рівень точності. Для того, щоб оцінити його потрібно використовувати незалежні спостереження, які не брали участь в навчанні моделі. З цією метою в бакалаврській роботі використано один із поширених методів ресемлінгу даних, зокрема метод k-Fold кросвалідації. Він

передбачає розбиття вихідного набору даних на два масиви – тренувального та валідаційного. У нашому випадку набір даних розбито порівну.

```
# Вибір набору вхідних даних для класифікації
data <- dataAll

# Формування тренувального (50% спостережень) і валідаційного (50% спостережень)
# піднаборів даних
set.seed(123)
train_index <- createDataPartition(data[,1], p = 0.5, list = FALSE)
train_data <- data[train_index, ]
test_data <- data[-train_index, ]
```

Як вже зазначалося, в бакалаврській роботі проаналізовано точність різних класифікаційних моделей. Першою аналізувалася модель, опрацьована на всьому наборі спектральних даних (травень, липень, жовтень).

```
rf_model <- randomForest(X_spgr_code ~ ., data = train_data, importance = T)
rf_model

Call:
randomForest(formula = X_spgr_code ~ ., data = train_data)
  Type of random forest: classification
    Number of trees: 500
No. of variables tried at each split: 6

      OOB estimate of  error rate: 23.08%
Confusion matrix:
  1 2 3 class.error
1 64 2 2  0.05882353
2  6 5 1  0.58333333
3  9 1 1  0.90909091
```

В характеристиці моделі наведено так звану внутрішню оцінку точності класифікатора, що відображає ймовірну величину помилки розпізнавання відповідного тематичного класу. Для більш достовірної оцінки та побудови матриці помилок використано валідаційний масив даних, який є повністю незалежним і не брав участь у розробці моделі.

```
# Створення матриці помилок і розрахунок загальної точності класифікації
predictions <- predict(rf_model, newdata = test_data)
confusion_matrix <- table(predictions, test_data$X_spgr_code)
confusion_matrix

predictions  1  2  3
           1 56  3 18
           2  3  2  1
           3  4  1  1
```

На основі одержаної матриці помилок були оцінені загальна точність класифікації, а також точності користувача та виробника.

```
> accuracy <- sum(diag(confusion_matrix)) / sum(confusion_matrix)
> print(accuracy)
[1]0.6629213
```

Зведена та оформлена матриця помилок для всього масиву даних наведена в табл. 3.1. За її даними розраховано загальну точність класифікації та точності користувача та виробника.

Таблиця 3.1

Матриця помилок класифікаційної моделі №1 (різночасові знімки)

Тематичні класи	Дійсні класи			Разом
	хвойні	твердолистяні	м'яколистяні	
Хвойні	56	3	18	77
Твердолистяні	3	2	1	6
М'яколистяні	4	1	1	6
Разом	63	6	20	89

Розрахунок загальної точності користувача: $OA = \frac{56+2+1}{89} = 66,3 \%$.

Точність користувача для класу:

- хвойні: $UA = \frac{56}{77} = 72,7 \%$.
- твердолистяні: $UA = \frac{2}{6} = 33,3 \%$.
- м'яколистяні: $UA = \frac{1}{6} = 16,7 \%$.

Точність виробника для класу:

- хвойні: $PA = \frac{56}{63} = 88,9 \%$.
- твердолистяні: $PA = \frac{2}{6} = 33,3 \%$.
- м'яколистяні: $PA = \frac{1}{20} = 5 \%$.

Отже, згідно з проведеними розрахунками загальна точність класифікації становила 66,3 %. Найбільша точність користувача та виробника спостерігається у класі «хвойні», тоді як найменша точність – в класі «м'яколистяні». Вказані

результати безпосередньо пов'язані з кількістю наявних даних. Низька точність свідчить про їх нестачу.

Такі ж розрахунки було проведено окремо для всіх трьох досліджуваних сезонів окремо. Побудовані матриці помилок наведені в табл. 3.2-3.4 для липня, травня та жовтня відповідно. Під кожною з таблиць наведено розрахунки точності.

Таблиця 3.2

Матриця помилок класифікаційної моделі №2 (знімки за липень)

Тематичні класи	Дійсні класи			Разом
	Хвойні	Твердолистяні	М'яколистяні	
Хвойні	55	3	19	77
Твердолистяні	4	2	0	6
М'яколистяні	4	1	1	6
Разом	63	6	20	89

Розрахунок загальної точності користувача: $OA = \frac{55+2+1}{89} = 65,2\%$.

Точність користувача для класу:

- хвойні: $UA = \frac{55}{77} = 71,4\%$.
- твердолистяні: $UA = \frac{2}{6} = 33,3\%$.
- м'яколистяні: $UA = \frac{1}{6} = 16,7\%$.

Точність виробника для класу:

- хвойні: $PA = \frac{55}{63} = 87,3\%$.
- твердолистяні: $PA = \frac{2}{6} = 33,3\%$.
- м'яколистяні: $PA = \frac{1}{20} = 5\%$.

Таблиця 3.3

Матриця помилок класифікаційної моделі №3 (знімки за травень)

Тематичні класи	Дійсні класи			Разом
	Хвойні	Твердолистяні	М'яколистяні	
Хвойні	58	6	15	79
Твердолистяні	2	0	2	4
М'яколистяні	5	0	1	6
Разом	65	6	18	89

Розрахунок загальної точності користувача: $OA = \frac{58+0+1}{89} = 66,3 \%$.

Точність користувача для класу:

- хвойні: $UA = \frac{58}{79} = 73,4 \%$.
- твердолистяні: $UA = \frac{0}{6} = 0 \%$.
- м'яколистяні: $UA = \frac{1}{6} = 16,7 \%$.

Точність виробника для класу:

- хвойні: $PA = \frac{58}{65} = 89,2 \%$.
- твердолистяні: $PA = \frac{0}{6} = 0 \%$.
- м'яколистяні: $PA = \frac{1}{18} = 5,6 \%$.

Таблиця 3.4

Матриця помилок класифікаційної моделі №4 (знімки за жовтень)

Тематичні класи	Дійсні класи			Разом
	Хвойні	Твердолистяні	М'яколистяні	
Хвойні	64	3	13	80
Твердолистяні	3	5	1	9
М'яколистяні	0	0	0	0
Разом	67	8	14	89

Розрахунок загальної точності користувача: $OA = \frac{64+5+0}{89} = 77,5 \%$.

Точність користувача для класу:

- хвойні: $UA = \frac{64}{80} = 80 \%$.
- твердолистяні: $UA = \frac{5}{9} = 55,6 \%$.

Точність виробника для класу:

- хвойні: $PA = \frac{64}{67} = 95,5 \%$.
- твердолистяні: $PA = \frac{5}{8} = 62,5 \%$.
- м'яколистяні: $PA = \frac{0}{14} = 0 \%$.

Відповідно до сформованих матриць помилок та проведених розрахунків можемо засвідчити, що найбільша загальна точність користувача у жовтні місяці. Це можна пояснити зміною кольору листя деревостанів у зв'язку з їх фенологією та покращення диференціації деревних видів. Також саме фенологією можна пояснити відсутність даних у травні для твердолистяних, оскільки знімки бралися за ранній період перед розпусканням дуба, та для м'яколистяних у жовтні, коли вони вже скинули листя.

Однак, якщо враховувати комплексну оцінку користувача і виробника, перша модель, яка використовувала різночасові знімки, має кращу точність визначення. Розрахунки матриць груп деревних порід у цьому варіанті не мають невизначених показників, що дозволить уникнути серйозних помилок у подальшій класифікації. Саме тому, як основну модель для ідентифікації деревних видів було обрано модель №1.

У роботі проаналізовано також внесок усіх використаних змінних на точність класифікації. Для цього скористалися стандартним алгоритмом моделі випадковий ліс, який розраховує на скільки % зменшиться точність класифікації, якщо відповідна змінна буде виключена з моделі. З рис. 3.1 видно, що фенологічний підхід до класифікації порід має важливе значення, оскільки в верхній частині списку найбільш важливих змінних потрапили спектральні канали з усіх сезонів знімання. Серед них найбільше значення мають ближній інфрачервоний, короткохвильовий інфрачервоний, червоний спектральні канали, які гарно відбивають зелене світло і відображають здорову не пошкоджену рослинність. Кожен сезон та місяць мають свої особливості й відмінності у фенологічних фазах рослин, що безпосередньо впливає на важливість того чи іншого каналу.

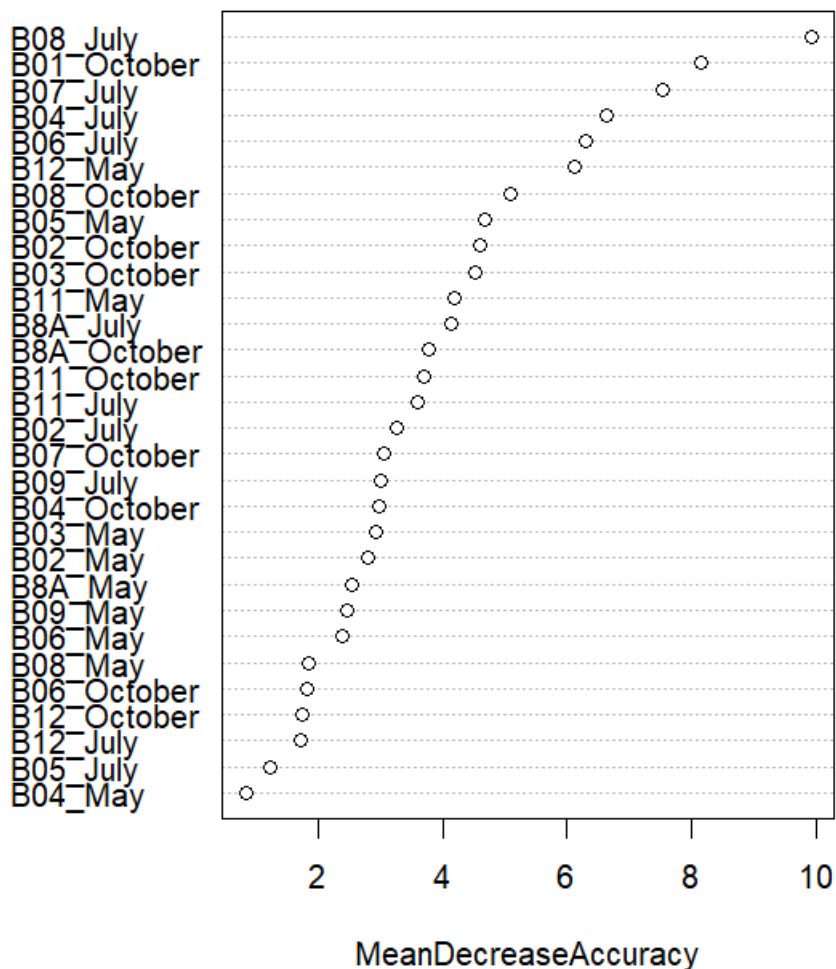


Рис. 3.1. Важливість впливу змінної (%) на точність класифікації

З рис. 3.1 також видно, у липні місяці найвагомими спектральними каналами є канали V08, V06, V04. Вони є каналам червоного спектру, тому рослинність має дуже гарне відбиття, що дає змогу оцінювати її стан, фотосинтетичну активність. З іншого боку, найменш важливими каналами є V05 та V12, що можна пояснити малою кількістю води за спекотного літа та сильною випаровуваністю.

У травні найважливішими спектральними каналами можна назвати такі: V12, V05, V11. Вони добре описують молоду здорову рослинність у стадії активного росту. Найменш вагомими за графіком визначено канали V04, V08, V06 – інфрачервоний спектр, який ще не може в повній мірі бути використаний в умовах початку вегетації.

У жовтні місяці найвагомим спектральним каналом визначено канал B08, який визначає здорову рослинність у ближньому інфрачервоному світлі. Менш важливі – B12, B06 в умовах, коли рослинність вже не так насичена хлорофілом.

3.2. Підготовка супутникових знімків до класифікації

Перш ніж розпочати класифікацію деревних порід необхідно отримати супутникові знімки дослідного об'єкту. Завантаження необхідних знімків виконувалося за допомогою комплексної програми спостереження за Землею “Copernicus”. Основними супутниками, які використовує ця програма для збору даних про поверхню землі є система супутників Sentinel. Загальний вигляд інтерфейсу програми під час вибору дослідних даних наведено на рис. 3.2.

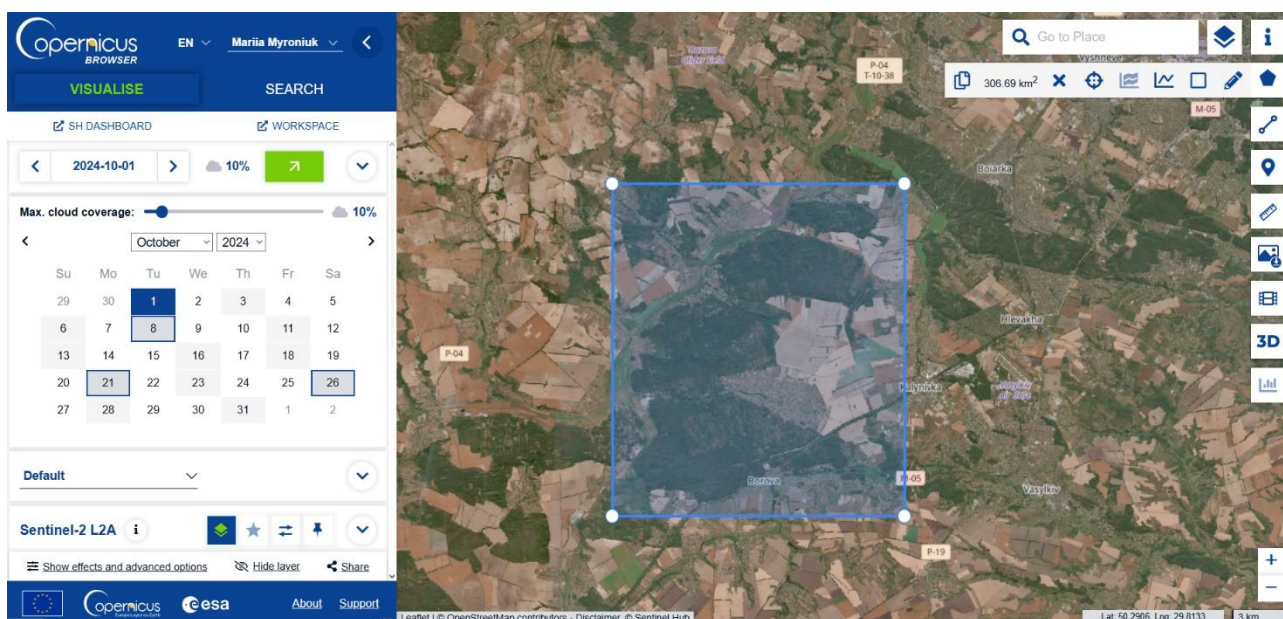


Рис. 3.2. Інтерфейс програми Copernicus

На рис. 3.2 можемо помітити, що перед початком роботи потрібно обов'язково обрати супутник, зону інтересу та дату, яка б відповідала необхідним термінам і не мала б хмар. Під час даної роботи бралися паралельно знімки Sentinel 2 за 2018 та 2024 роки за травень, липень, жовтень в найближчі

відповідні безхмарні дати. Знімки завантажувалися у всіх можливих спектральних каналах (12), що можна побачити на рис. 3.3.

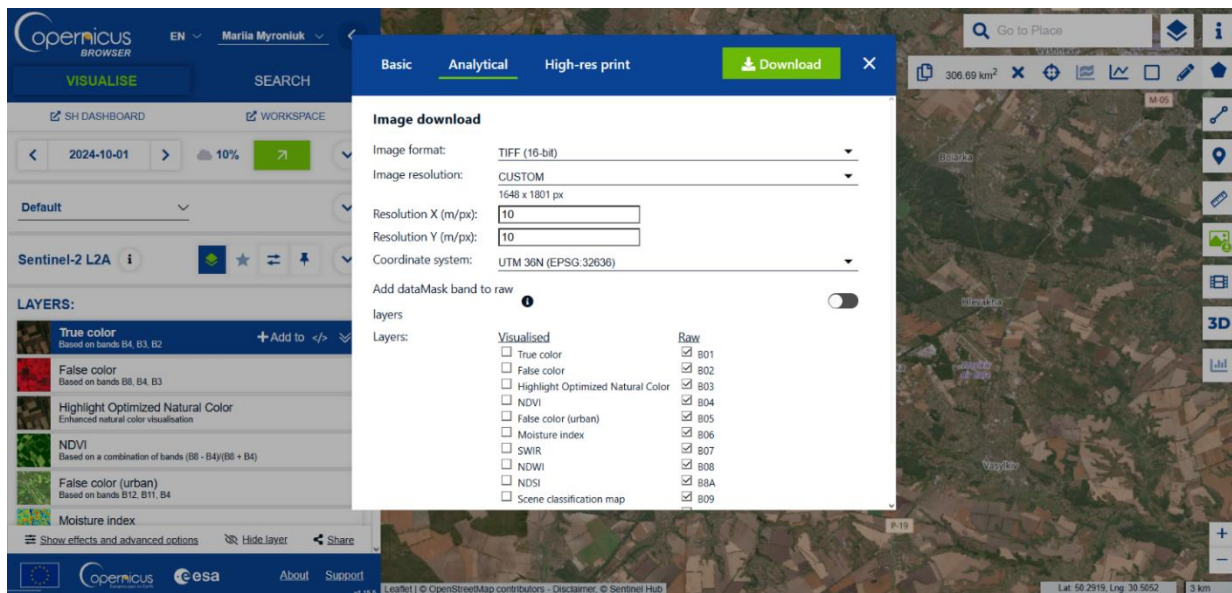


Рис. 3.3. Завантаження знімків за допомогою Copernicus

Після завантаження спектральних каналів знімків Sentinel 2, їх необхідно поєднати в багатоканальне зображення. Оскільки супутниковий знімок містить інформацію про геометричні розміри об'єктів і має систему координат проекцій, робота виконувалася в програмі з відкритим кодом QGIS. За результатами виконання даної роботи було отримано 6 знімків по 2 на кожен сезон за 2018 і 2024 рік. Знімки відображено на рисунках 3.4-3.6.

2018-05-01



2024-05-01



Рис. 3.4. Супутниковий знімок Sentinel 2 території досліджень станом на початок сезону вегетації

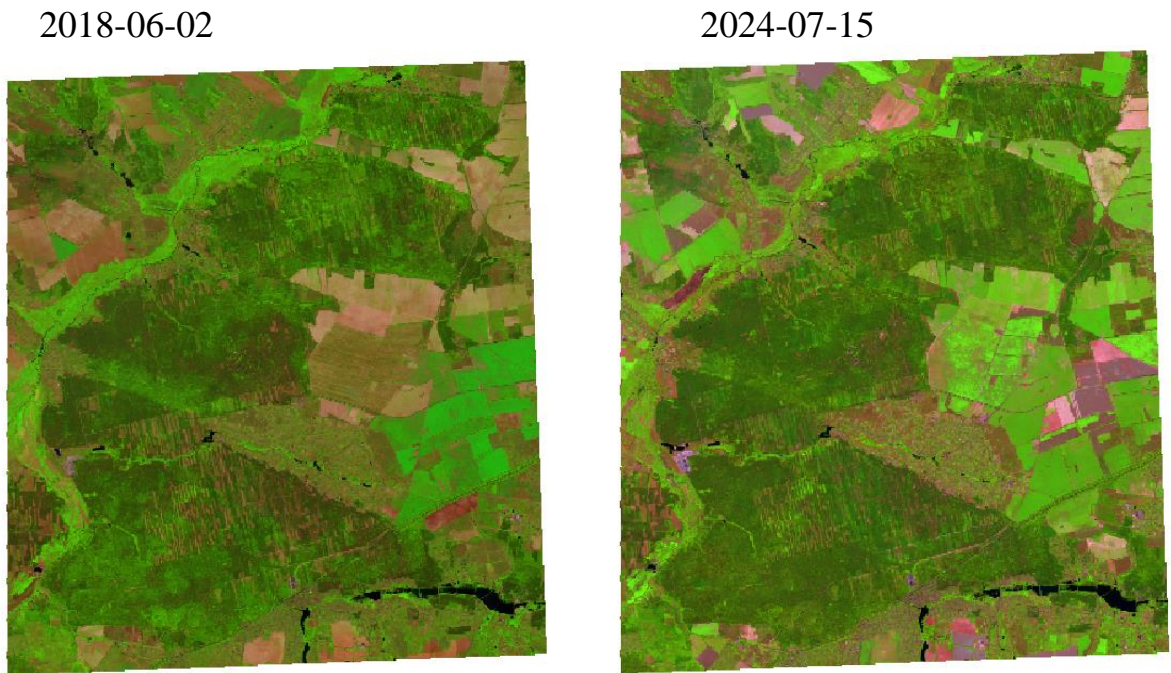


Рис. 3.5. Супутниковий знімок Sentinel 2 території досліджень станом на середину сезону вегетації

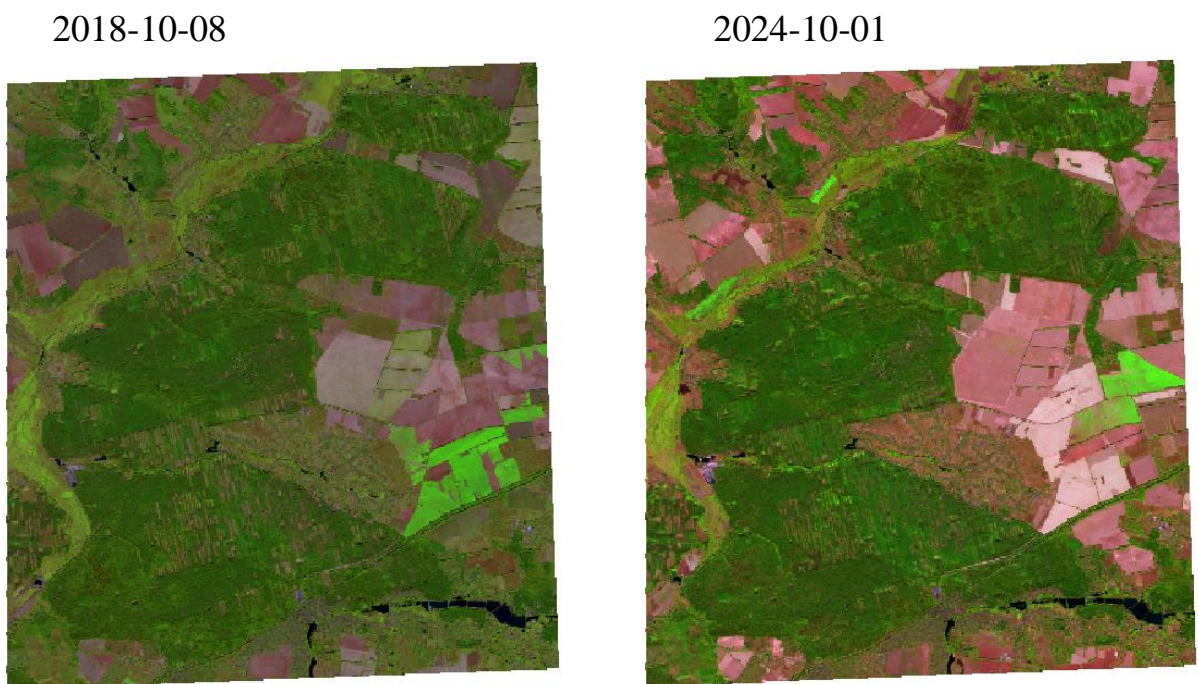


Рис. 3.6. Супутниковий знімок Sentinel 2 території досліджень станом на кінець сезону вегетації

За візуальним аналізом даних знімків можна спостерігати зміни у структурі насаджень через дію фактору часу, а також щосезонні перетворення. Саме другі

допомагають ідентифікувати перші через сезонну зміну листяного і трав'яного покриву, що допомагає у визначенні листяних насаджень та зрубів.

3.3. Створення карти панівних порід

Маючи лише спектральні знімки, неможливо у повній мірі провести ідентифікацію всіх деревних порід та скласти повне уявлення про структуру насадження. Саме для цього ми використовуємо натреновану модель Random Forest (випадковий ліс). Згідно проведених розрахунків щодо точності класифікацій, вирішено проводити подальшу ідентифікацію деревних видів насадження за весь вегетаційний період, використовуючи класифікаційну модель №1.

Перед початком дослідження необхідно завантажити область інтересу в межах лісових насаджень Боярської ЛДС. Далі завантажуються знімки та обов'язково змінюються назви каналів відповідно до таблиці з даними для можливості їх розпізнання моделлю.

```
# Завантаження області інтересу
aoi <- read_sf("d:/диплом/aoi/dissolved_aoi.shp")

# Завантаження знімка та зміна назв каналів відповідно до колонок таблиці з даними
imgOct <- rast("d:/диплом/Copernicus/2024/October/october_01_2024.tif")
names(imgOct) <- names(dataOct)[-13]

imgJuly <- rast("d:/диплом/Copernicus/2024/June/july_15_2024.tif")
names(imgJuly) <- names(dataJuly)[-13]

imgMay <- rast("d:/диплом/Copernicus/2024/April/may_01_2024.tif")
names(imgMay) <- names(dataMay)[-13]
```

Оскільки обрана нами модель класифікації включає 3 інші, для її активації необхідно зібрати стек з усіх сезонів і вказати створене зображення для розрахунків.

```
# зібрати стек
imgAll <- rast(list(imgMay, imgJuly, imgOct))
img <- imgAll
```

Подальше обрізання знімку в границях області інтересу було відображено у спектральному каналі B08 (NIR), зображення якого виведено на рис. 3.7.

```
# Обрізування в границях області інтересу
img <- mask(img, mask = aoi)
img <- crop(img, aoi)

# visualize
plot(img[[8]]) # номер каналу або список каналів
```

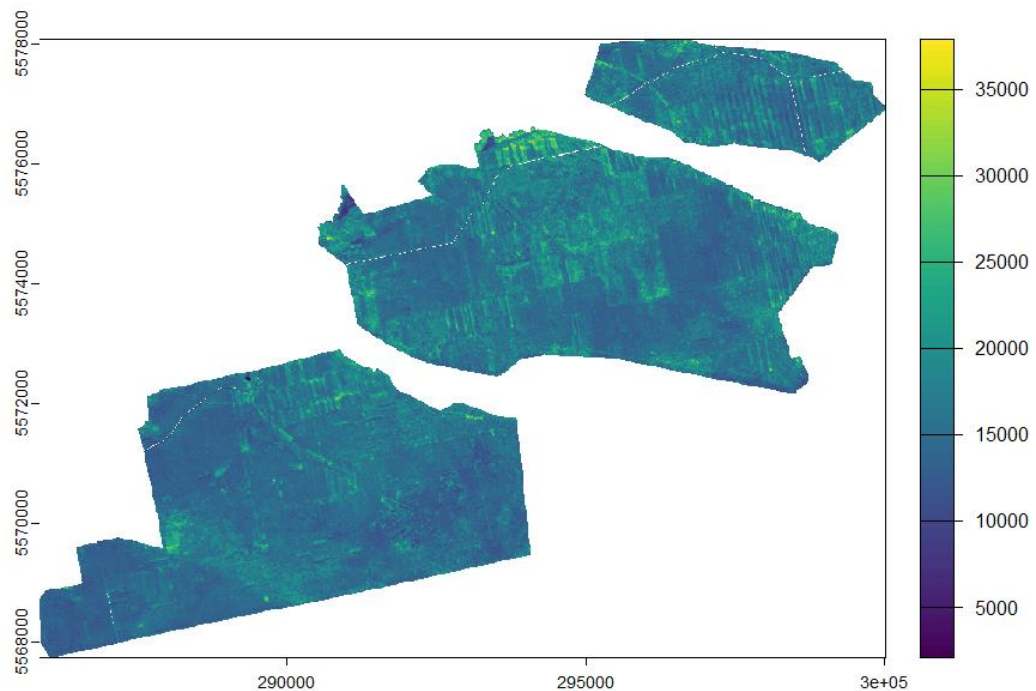


Рис 3.7. Відображення області в інтересу в спектральному каналі B08 (NIR) за вегетаційний період 2024 рік

Готову зону інтересу класифікуємо натренованою моделлю і зберігаємо.

```
# Класифікація знімка
clAll <- predict(img, model = rf_model, na.rm = T,
                filename = "d:/диплом/Copernicus/class/clAll.tif",
                overwrite = T, progress = "text")
```

Результати ідентифікації деревних порід відображені на рис. 3.8. Це найбільш повна й цілісна ідентифікація отримана у результаті збору даних за всі 3 сезони вегетаційного періоду. Дану карту було створено за допомогою програми QGIS. Беручи до уваги змінні за травень, липень і жовтень дана карта відображає структуру панівних порід за їх групами для Боярської ЛДС.

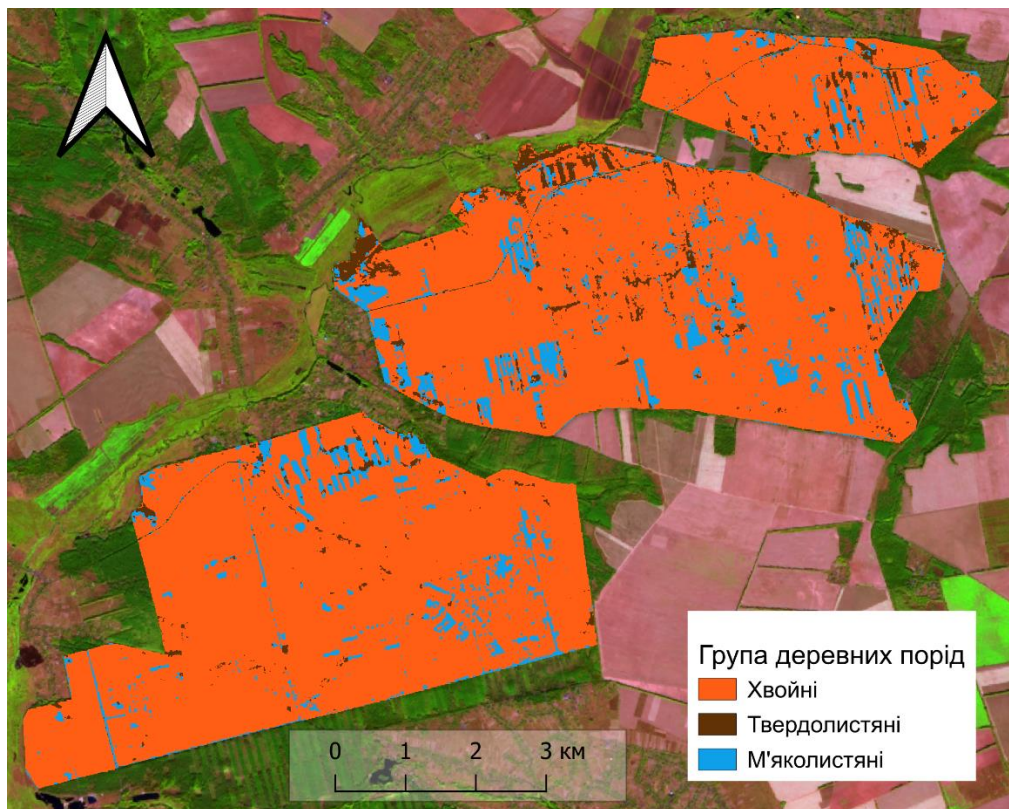


Рис. 3.8. Карта деревних порід Боярської ЛДС станом на вегетаційний сезон 2024 року, одержана за класифікаційною моделлю № 1 (різночасові знімки)

Такі ж карти було створено окремо для кожного з досліджуваних сезонів. Наявність цих даних допомагає у спостереженні часової диференціації лісів, кращому розумінні їх фенології. Карти деревних порід Боярської ЛДС за липень, травень та жовтень місяці наведено на рис. 3.9-3.11 відповідно.

З рис. 3.9-3.11 видно, що карти за різні сезони мають різне відображення та структуру насадження. Так, у травні місяці частка твердолистяних порід становить значно більше ніж у липні. На нашу думку, це може бути викликано відмінністю спектрального відбиття. У травні дуб ще розпускається і має дуже гарне спектральне відображення, тоді як у липні спектр стає дещо схожим до хвойних порід, що й ускладнює ідентифікацію. У жовтні листяні види фенологічно змінюють забарвлення листя, допомагаючи у класифікації деревних видів.

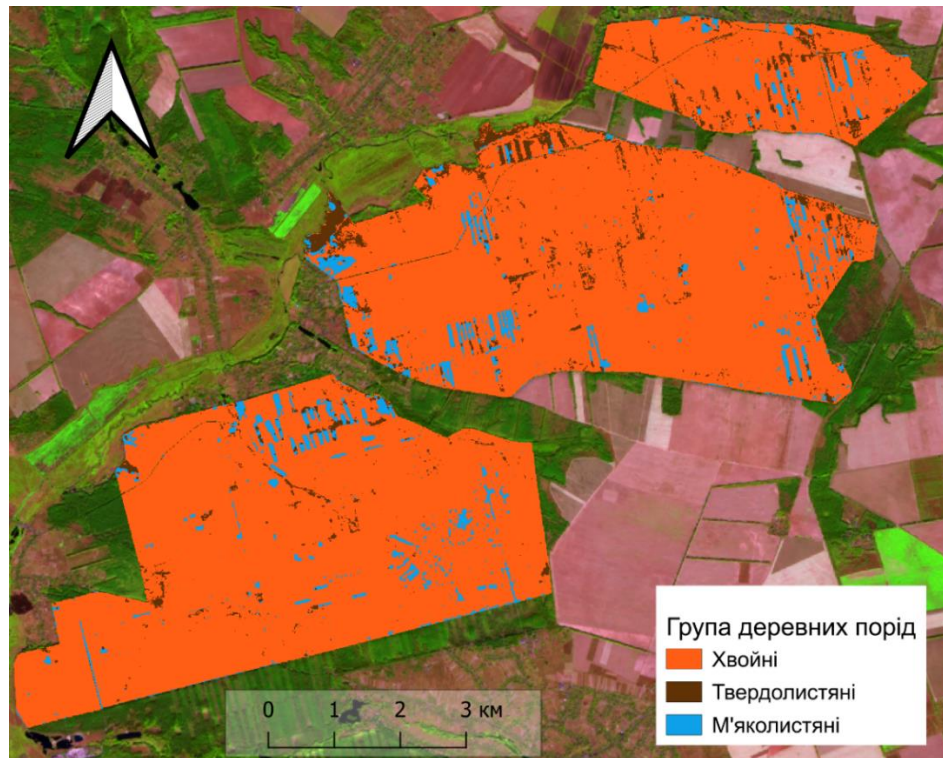


Рис. 3.9. Карта деревних порід Боярської ЛДС станом на липень 2024 року, одержана за класифікаційною моделлю № 2 (знімки за липень)

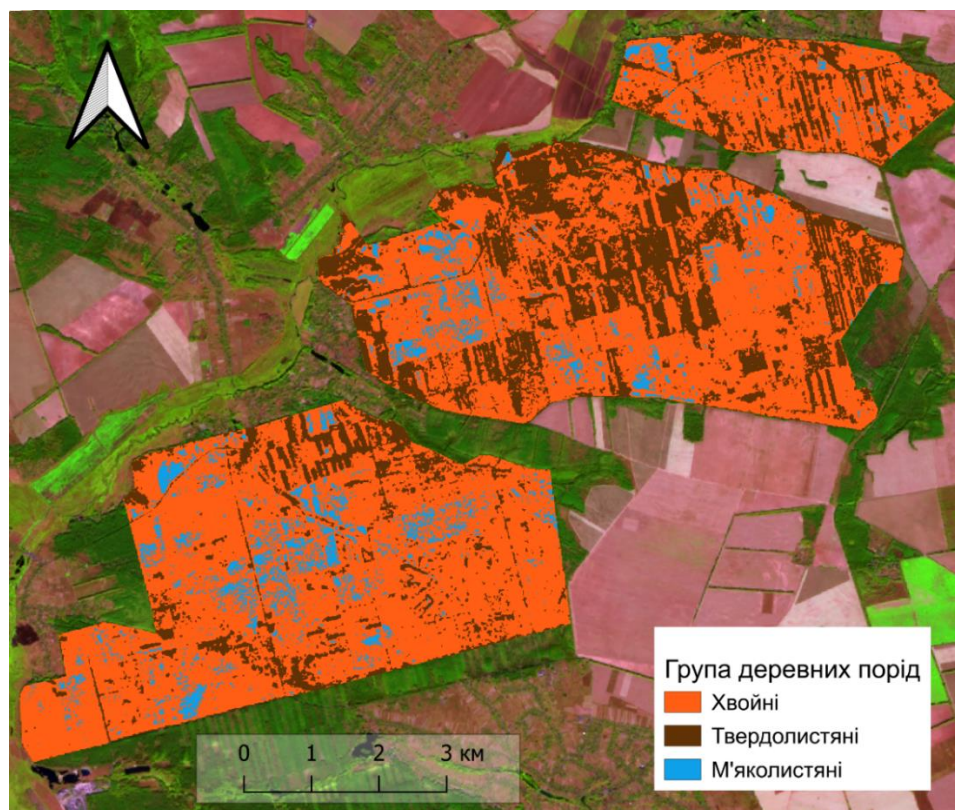


Рис. 3.10. Карта деревних порід Боярської ЛДС станом на травень 2024 року, одержана за класифікаційною моделлю № 3 (знімки за травень)

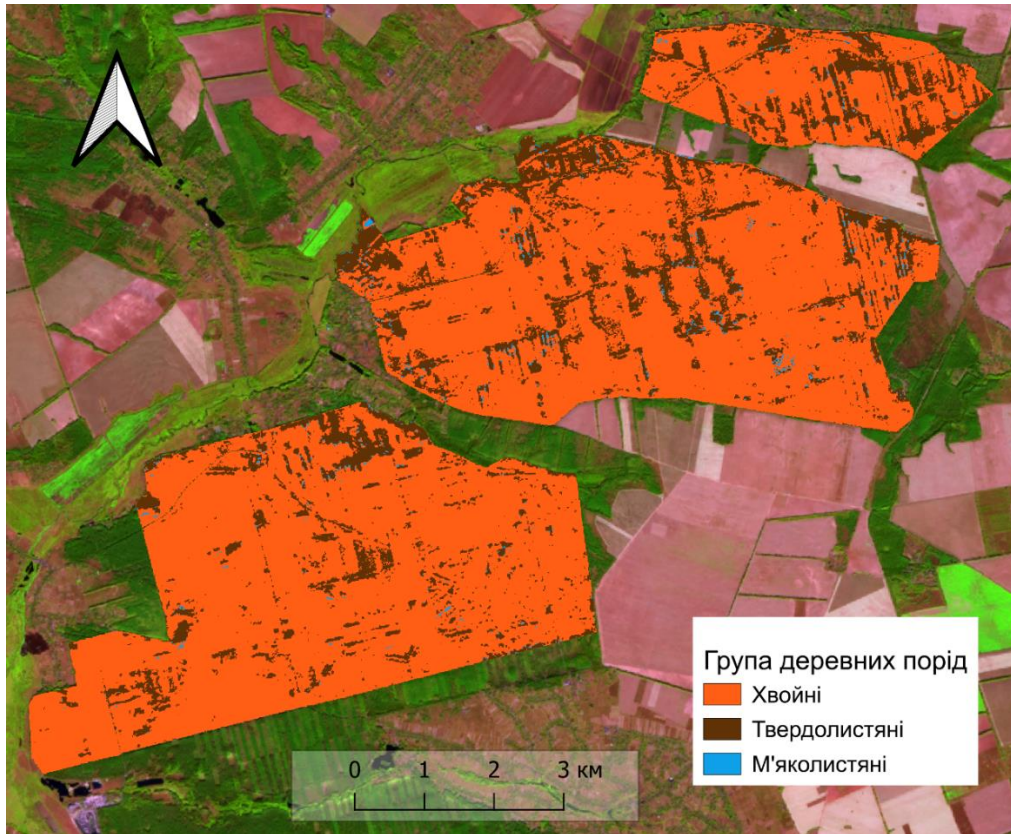


Рис. 3.11. Карта деревних порід Боярської ЛДС станом на жовтень 2024 року, одержана за класифікаційною моделлю № 4 (знімки за жовтень)

Відзначимо, що значна частина дерев групи «м'яколистяні» (береза повисла) дуже гарно поновлюються на лісосіках, що пояснює правильність форми насаджень та ідентифікацію дерев на зрубках.

Висновки до розділу 3.

1. Різномасштабні супутникові дані дозволяють підвищити точність класифікації панівних порід.
2. Для вибору ефективного методу картографування видового складу лісів, потрібно враховувати особливості поширення порід та точність класифікаційних знімків.
3. Диференціацію хвойних і листяних деревостанів найкраще виконувати на початок та на кінець сезону вегетації.

ВИСНОВКИ

Під час виконання дослідження щодо дешифрування видового складу лісів ВП НУБіП України «Боярська ЛДС» було визначено, що супутникові знімки Sentinel 2 є ефективним джерелом безкоштовних даних про стан і динаміку лісових насаджень. Сучасний стан технологій дистанційного зондування землі дозволяє вирішувати широкий спектр задач у сфері лісового господарства, що забезпечує наявність актуальних і точних даних про стан лісів та є необхідною передумовою для ефективного управління лісами.

Сучасні системи супутникового моніторингу можуть поєднуватися із показниками, одержаними на інвентаризаційних ділянках. Вибіркова інвентаризація лісів є надійним джерелом даних про лісові ресурси. Ефективне поєднання цих двох типів даних дозволяє отримати більш точні, актуальні та детальні карти лісів, покращити процеси інвентаризації та моніторингу, забезпечуючи систематичне оновлення лісових карт.

Експериментальні дослідження на території ВП НУБіП Боярська ЛДС щодо інвентаризації лісів вибірковими методами, створюють основу для перевірки ефективності дистанційного моніторингу лісів. Основним результатом прогнозування показників лісового фонду є растрові карти, на яких відображаються розподіл сум площ і деревних запасів лісових насаджень. Саме вони створюють основу для розрахунку середніх і загальних значень цих показників за елементами лісу.

Використання ретроспективних даних відбору проб потребує залучення часових рядів супутникових знімків, що в свою чергу дозволяє підвищити точність класифікації панівних порід. Використання різночасових знімків дозволяє також відстежувати динаміку змін рослинного покриву та виявити площі, де втрачено лісові масиви або відбулося лісовідновлення.

Для вибору ефективного методу картографування видового складу лісів, потрібно враховувати особливості поширення порід та точність класифікаційних знімків. Так, диференціацію хвойних і листяних деревостанів найкраще виконувати на початок та кінець сезону вегетації. Це пов'язано з фенологічними фазами деревних видів, що впливає на спектральне випромінювання і відображення видів на картах деревних порід.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Букша І., Букша М., Черни М. Польова ГІС для лісового господарства. Якісно нові можливості для польового збирання інформації в лісовому господарстві. Лісовий і мисливський журнал, 2011. № 3. С. 16–19.
2. Вицега В. С., Козак Р. Р. Аналіз методів таксації лісових насаджень із застосуванням ГІС-технологій. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2007. Вип. 17.2. С. 260–264.
3. Вицега Р. Р. Методичні засади вибіркової інвентаризації гірських лісів. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2007. Вип. 17.2. С. 32–38.
4. Звіт з оцінки впливу на довкілля спеціального використання лісових ресурсів в порядку проведення поступових рубок головного користування (землі не належать до територій об'єктів природно-заповідного фонду або їхніх охоронних зон), Київська область, Києво-Святошинський, Васильківський, Макарівський райони / ВП НУБіП України «Боярська ЛДС», Ін-т агроєкології і природокористування НААН ; викон.: В. В. Конішук. Київ, 2020. 1036 с.
5. Інвентаризація лісів України за даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ-інвентаризація): Методологія, карти результатів та оцінки / В. Миронюк ; за підтримки Федерального міністерства продовольства та сільського господарства Німеччини. Київ : ДАЛРУ, GFA Consulting Group, unique land use GmbH, IAK Agrar Consulting GmbH, 2023. 44 с. (Звіт SFI/2023). URL: <https://nfi.lisproekt.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/sfi-report-ua-myroniuk-v.1.2.2.pdf> (дата звернення: 26.05.2025).
6. Миклуш С. І., Вицега Р., Черни М. Статистична інвентаризація насаджень Верхньодністровських і Сколівських Бескид. Лісівництво і агролісомеліорація. 2006. Вип. 109. С. 117–126.
7. Миклуш С. І., Гаврилюк С. А., Часковський О. Г. Дистанційне зондування землі в лісовому господарстві : навчальний посібник. Львів: ЗУКЦ, 2012. 324 с.

8. Миклуш С. І., Часковський О. Г., Гаврилюк С. А. Дешифрування різнопланових космічних знімків для оцінювання груп порід. Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2013. Вип. 11. С. 144–150.

9. Миرونюк В. В., Мельниченко В. А., Лакида М. О., Терентьев А. Ю., Домашовець, Г. С. Значення часових рядів супутникового знімання та історичних даних лісовпорядкування для інвентаризації лісів України. Науковий вісник НЛТУ України. 2023. Вип. 33(5). С. 21-27. <https://doi.org/10.36930/40330503>.

10. Миронюк В. В. Інвентаризація рівнинних лісів України за даними супутникової зйомки. Монографія. Харків : АТ «Харківська книжкова фабрика “Глобус”», 2020. 240 с.

11. Миронюк В. В. Сезонна динаміка спектральних характеристик земного покриву та її роль у дешифруванні лісових насаджень за знімками Landsat. Науковий вісник НУБіП України. 2017. Вип. 266. С. 54–64.

12. Миронюк В. В., Білоус А. М., Дячук П. П., Федина К. Р. Точність вибіркової таксації лісу залежно від конфігурації пробних ділянок. Біоресурси і природокористування. 2018. Вип. 10(5–6). С. 146–155.

13. Миронюк В. В., Кохан С. С., Востоков А. Б. Особливості визначення видового складу міських зелених насаджень за даними супутникових знімків GeoEye-1. Біоресурси і природокористування. 2012. Вип. 4 (5–6). С. 176–182.

14. Миронюк В. В., Свинчук В. А., Білоус А. М., Василюшин Р. Д. Лісова таксація : навчальний посібник. К.: Вид-во НУБіП України. 2019. 220 с.

15. Національна інвентаризація лісів : веб-сайт. URL: <https://lisprojekt.gov.ua/dijalnist/nacionalna-inventarizacija-lisiv> (дата звернення: 26.05.2025).

16. Про затвердження Порядку проведення національної інвентаризації лісів : Постанова Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2021 р. № 392. Офіційний вебпортал парламенту України «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392-2021-п#Text> (дата звернення: 26.05.2025).

17. Сторожук В., Поллей Г. Инвентаризация лесів – статус кво в Україні, досвід Німеччини та вказівки від FAO (Звіт з аграрної політики: APD/APB/07/2017). Київ, 2007. 52 с.
18. Черны М., Вopenка П., Левкивский Н. П., Букша И. Ф. Определение густоты сети пробных площадок национальной инвентаризации лесов Украины. Науковий вісник Національного аграрного університету. 2006. Вып. 103. С. 163–172.
19. Blickensdörfer L., Oehmichen K., Pflugmacher D., Kleinschmit B., Hostert P. National tree species mapping using Sentinel-1/2 time series and German National Forest Inventory data. Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 304, Article Id: 114069. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114069>
20. Bontemps J.-D. Review of: Multi-source national forest inventory methods and applications / E. Tomppo, M. Haakana, M. Katila, J. Peräsaari. Annals of Forest Science. 2009. Vol. 66, No. 4. P. 2.
21. Breidenbach J., Waser L. T., Debella-Gilo M., Schumacher J., Rahlf J., Hauglin M., Puliti S., Astrup R. National mapping and estimation of forest area by dominant tree species using Sentinel-2 data. Canadian Journal of Forest Research. 2021. Vol. 51(3). P. 365–379. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0170>
22. Fassnacht F. E., White J. C., Wulder M. A., Næsset, E. Remote sensing in forestry: Current challenges, considerations and directions. Forestry: An International Journal of Forest Research. 2024. Vol. 97(1). P. 11–37. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad024>
23. Forestry Inventory Methods : Forestry Technical Note No. FOR-1 / United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service ; C. Town et al. Washington, DC, 2018. 30 p.
24. Grabska E., Hostert P., Pflugmacher D., Ostapowicz K. Forest Stand Species Mapping Using the Sentinel-2 Time Series. Remote Sensing. 2019. Vol. 11(10). Article Id: 1197. <https://doi.org/10.3390/rs11101197>
25. Immitzer M., Neuwirth M., Böck S., Brenner H., Vuolo F., Atzberger C. Optimal Input Features for Tree Species Classification in Central Europe Based on

Multi-Temporal Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11(22). Article Id: 2599. <https://doi.org/10.3390/rs11222599>

26. Landsat Science. Landsat 8: веб-сайт. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/> (дата звернення: 04.05.2025).

27. Lindgren D. T. The Landsat system. *Land use planning and remote sensing*. Springer Science, Business Media Dordrecht, 1985. P. 67–86. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-2035-9_6.

28. MODIS : веб-сайт. URL: <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis> (дата звернення: 17.05.2025).

29. Myroniuk V., Bell D. M., Gregory M. J., Vasylyshyn R., Bilous A. Uncovering forest dynamics using historical forest inventory data and Landsat time series. *Forest Ecology and Management*. 2022. Vol. 513. Article Id: 120184. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120184>

30. Nilsson, M. et al. Combining Remote Sensing and Field Data for Deriving Unbiased Estimates of Forest Parameters over Large Regions. In: Corona, P., Köhl, M., Marchetti, M. (eds) *Advances in Forest Inventory for Sustainable Forest Management and Biodiversity Monitoring*. *Forestry Sciences*. 2003. Vol. 76. P. 19–32. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0649-0_2.

31. Ottosen T.-B., Petch G., Hanson M., Skjøth C. A. Tree cover mapping based on Sentinel-2 images demonstrate high thematic accuracy in Europe. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. Vol. 84. Article Id: 101947. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101947>

32. PlanetScope : веб-сайт. URL: <https://docs.planet.com/data/imagery/planetscope/> (дата звернення: 17.05.2025).

33. The European Space Agency. The Sentinel missions : веб-сайт. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/The_Sentinel_missions (дата звернення: 04.05.2025).

ДОДАТКИ

Додаток А. Структура вихідної таблиці з даними

```

> str(data)
'data.frame':   180 obs. of  43 variables:
 $ fid      : int  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ...
 $ id       : int  14 51 53 81 88 118 122 123 125 126 ...
 $ lon      : num  30 30 30 30 30 ...
 $ lat      : num  50.2 50.2 50.2 50.2 50.2 ...
 $ Dom_sp.  : chr  "BEPE" "BEPE" "BEPE" "BEPE" ...
 $ B01_July : int  2431 2471 4411 1887 2477 1868 1986 2589 2425 2870 ...
 $ B02_July : int  2523 2693 4542 2182 2739 2202 2346 2641 2772 3768 ...
 $ B03_July : int  3218 3355 5774 3067 3382 3060 2792 3368 3860 4791 ...
 $ B04_July : int  2543 2956 5852 1868 2726 1769 2012 2739 2667 5518 ...
 $ B05_July : int  4974 5059 8585 4758 4823 4469 4017 5236 5099 7825 ...
 $ B06_July : int  11849 11108 16698 18448 11410 18304 11619 12340 14955 12937 ...
 $ B07_July : int  13756 12865 19877 22918 13369 22072 13933 14090 18212 14667 ...
 $ B08_July : int  14496 13848 21201 24012 14326 24851 14509 14391 21056 15669 ...
 $ B8A_July : int  14831 14038 21862 23986 14555 23966 15139 15257 18953 16915 ...
 $ B09_July : int  14863 14129 19025 23829 13966 23029 15689 15034 16646 16456 ...
 $ B11_July : int  10938 9804 19038 11488 8932 11128 8441 11449 11403 16318 ...
 $ B12_July : int  6232 5584 12209 5426 5131 5144 4358 7301 6154 10630 ...
 $ B01_May  : int  2123 2097 3624 1966 2077 1920 1855 2268 1999 2687 ...
 $ B02_May  : int  2300 2320 3880 2268 2241 2150 1959 2503 2104 3349 ...
 $ B03_May  : int  3093 3054 5210 3460 3119 3768 2648 3283 3192 4417 ...
 $ B04_May  : int  2897 2825 4961 2320 2497 2071 2064 3113 2654 5144 ...
 $ B05_May  : int  4869 4535 7838 5610 4483 6088 4004 5551 5000 7268 ...
 $ B06_May  : int  9129 8893 16207 12504 9476 14785 9411 9660 9915 9896 ...
 $ B07_May  : int  10197 10263 18927 14437 11023 16901 10971 10951 11842 10997 ...
 $ B08_May  : int  10558 11134 20453 15381 11357 17000 11318 11187 11973 11606 ...
 $ B8A_May  : int  11036 11423 20860 15578 11639 17092 11895 12065 12550 12543 ...
 $ B09_May  : int  11331 11567 16502 15696 11724 16469 12294 11606 12327 12484 ...
 $ B11_May  : int  9680 8284 17596 10800 7740 9850 7366 10695 9522 14024 ...
 $ B12_May  : int  5951 4751 10839 5977 4378 5079 3919 7274 5610 9680 ...
 $ B01_October: int  944 898 2353 550 1035 590 727 970 957 1265 ...
 $ B02_October: int  1121 1206 2235 1193 1291 1068 872 1363 917 1278 ...
 $ B03_October: int  2071 1717 3368 2150 2136 1842 1645 2104 1848 2110 ...
 $ B04_October: int  1815 1317 3172 1579 1579 1409 1094 1737 1278 2051 ...
 $ B05_October: int  4260 3323 6396 3893 3794 3604 3028 3978 3336 3893 ...
 $ B06_October: int  7864 8533 12452 9896 9889 9352 8926 8946 8290 7229 ...
 $ B07_October: int  9542 10250 14575 11324 11508 11534 10735 10689 9601 8349 ...
 $ B08_October: int  9326 10335 15532 15420 11279 13009 10250 10276 9634 7569 ...
 $ B8A_October: int  10820 11043 16312 13789 12393 13258 11764 11875 11115 9719 ...
 $ B09_October: int  10604 11174 14195 13743 12013 12517 12425 11888 11272 10800 ...
 $ B11_October: int  7766 5918 15532 8146 5708 8225 5433 7196 5708 7786 ...
 $ B12_October: int  4188 2825 9024 3572 2739 3709 2497 3683 2693 4417 ...
 $ X_sc_code  : int  4 4 4 4 4 2 4 4 4 4 ...
 $ X_spgr_code: int  3 3 3 3 3 2 3 3 3 3 ...

```