

Технічна підтримка розвитку лісової політики та впровадження національної інвентаризації лісів



Концептуальне дослідження: Підтримка національної інвентаризації лісів на основі дистанційного зондування

Технічна підтримка розвитку лісової політики та впровадження національної інвентаризації лісів

**Концептуальне дослідження: Підтримка національної
інвентаризації лісів на основі дистанційного зондування**

Замовник

Українсько – німецький проєкт із впровадження сталого лісового
господарства (SFI)

N проєкту: W-UKR 21-01

Автори

Д-р Аксель Вайнрайх

Максиміліан Шперліх

Віктор Миронюк

Юрій Фаріон

Дата

31 березня, 2023

Зміст

Список таблиць	V
Список малюнків	V
Список скорочень	VII
Короткий огляд	1
Частина I: Загальний огляд концепції	2
2.1. Вступ	2
2.2. Вимоги до даних та методологічні можливості для підтримки НІЛ на основі ДЗЗ	3
2.2.1. Платформи та датчики дистанційного зондування	3
2.2.2. Вимоги до супутникових даних	7
2.2.3. Вимоги до функцій	9
2.2.4. Методи оцінки змінних структури лісу за даними дистанційного зондування	10
2.3. Рекомендовані процеси	11
2.3.1. Загальний операційний ланцюжок	12
2.3.2. Вхідні дані	15
2.3.2.1. Супутникові знімки високої роздільної здатності – Sentinel-2	15
2.3.2.2. Допоміжні дані	16
2.3.3. Референтні дані	17
2.3.4. Попередня обробка супутникових знімків	19
2.3.4.1. Попередня обробка зображень	20
2.3.4.2. Виведення результатів попередньої обробки даних спостереження за Землею (EO)	21
2.3.5. Обчислення структурних змінних лісу	22
2.3.6. Складання кінцевих продуктів (карт)	23
Частина II: Збір, опис та аналіз референтних даних	28
3.1. Необхідні дані	29
3.1.1. Вихідні дані	29
3.1.2. Допоміжні дані	29
3.2. Оцінка відповідності вимогам	29
3.3. Оцінка відповідності	30

3.4.	Підготовка вихідних даних	31
3.4.1.	Дані лісовпорядкування	31
3.4.1.1.	Опис даних лісовпорядкування як джерела вихідних даних	31
3.4.1.2.	Підготовка даних лісовпорядкування як джерела вихідних даних	33
3.4.2.	Дані НІА	35
3.4.2.1.	Опис даних НІА як джерела вихідних даних	35
3.4.2.2.	Польові вимірювання автоматично зберігаються в базі даних, яка контролює якість зібраних даних. Підготовка даних НІА як джерела вихідних даних	37
Частина III: план впровадження		40
A 1.	Використання дистанційного зондування для інвентаризації та картографування лісів в Україні	42
A 1.1.	Нещодавні досягнення, що покращують можливості моніторингу лісів на основі ДЗЗ в Україні	42
A 1.2.	Використання знімків Sentinel 2 для картографування лісового покриву України	46
A 1.3.	Роль супутникових часових рядів та методу імплікації найближчого сусіда в інвентаризації лісів України на основі ДЗЗ	50
A 1.4.	Висновки	54
A 2.	Атрибути рівня лісовпорядкування	55
Література		61

Список таблиць

Таблиця 1 Огляд очікуваних кінцевих продуктів та джерел довідкових даних для підготовки моделі аналізу ДЗЗ	14
Таблиця 2 Діапазони, що застосовуються в Sentinel-2A	16
Таблиця 3 Референтні дані змінної лісової структури	17
Таблиця 4 Референтні дані змінної лісової структури	34
Таблиця 5 Шари просторових даних, що використовуються в GIS для оцінки та розмежування ділянок НІЛ	39
Таблиця 6: Пропонований план робіт та графік реалізації НІЛ на основі ДЗЗ.....	40

Список малюнків

Малюнок 1 Порівняння висоти польоту (H), покриття зображення (C) та просторової роздільної здатності (R; як відстані до землі (GSD) для мультиспектральних зображень, так і щільності точок для хмари точок LiDAR) платформ дистанційного зондування БПЛА, літака та супутника.....	3
Малюнок 2 Спектральні характеристики відбиття (внизу) у видимому (0,38 - 0,75 мкм), ближньому (0,75 - 1,4 мкм) та короткохвильовому інфрачервоному (1,4 - 3 мкм) діапазонах для трьох поширених типів земного покриття, показані разом з розташуванням спектральних діапазонів ряду поширених датчиків (вгорі), деякі з яких мають додаткові діапазони, що простягаються далі в інфрачервоному діапазоні, які тут не показані (Richards, 2013, С. 11).....	4
Малюнок 3 Повернутий дискретний сигнал (червоні точки) і форма сигналу випромінюваного імпульсу від системи LiDAR (Lindberg & Holmgren, 2017).....	5
Малюнок 4 Пентація сигналів SAR відповідно до використовуваної довжини хвилі SAR (модифіковано з посібника NASA з SAR).....	8
Малюнок 5 Схематичний огляд ланцюжка обробки даних прикладних сервісів Forest Flux (Häme, et al., 2022)	12
Малюнок 6 Блок-схема попередньої обробки супутникових знімків HR (Häme, et al., 2022)	20
Малюнок 7 Ланцюжок попередньої обробки супутникових знімків VHR (Häme, et al., 2022)	21

Малюнок 8 Обчислювальний ланцюжок для прогнозування лісових змінних та класифікації земного покриву (Häme, et al., 2022)	22
Малюнок 9 Приклади класифікації земного покриву та деревних порід у Фінляндії (ліворуч) та оцінка обсягу деревостанів за видами (праворуч, червоним кольором позначені лісогосподарські одиниці) (Häme, et al., 2022)	24
Малюнок 10 Приклад карти лісового покриву (зелений колір) та нелісових територій (білий колір) у Німеччині) (Häme, et al., 2022)	25
Малюнок 11 Середня розрахункова площа основи/га (Німеччина, ліворуч) та класифікація типів лісу (Фінляндія, праворуч) (Häme, et al., 2022)	26
Малюнок 12 Висота дерева (ліворуч) та об'єм стовбура (праворуч) в Румунії (Häme, et al., 2022)	26
Малюнок 13 Пропорції фальш-композиту та деревних порід у Фінляндії (Häme, et al., 2022)	27
Малюнок 14 Приклад для полігонів лісовпорядкування, позначених кольором домінуючих порід дерев	32
Малюнок 15 Взаємозв'язки таблиць у базі даних лісовпорядкування	33
Малюнок 16 Кластери з чотирьох пробних ділянок на клітинку сітки для однієї області	36
Малюнок 17 Один кластер, що включає чотири пробні площі з радіусом обстеження 12,62 мкожна	36
Малюнок 18 Дизайн ділянки - структура концентричного кола	37
Малюнок 19 Порівняння висоти польоту (H), покриття знімків (C) та просторової роздільної здатності (R; як відстань до землі (GSD) для мультиспектральних знімків та щільність точок для хмари точок LiDAR) БПЛА, літаків та супутникових платформ дистанційного зондування	38
Малюнок 20 Динаміка лісистості (суцільні лінії) на основі класифікації часових рядів Landsat з 95% довірчими інтервалами (штрихи) для двох областей України (Миронюк та ін., 2022)	51
Малюнок 21 Розподіл окремих видів у межах Івано-Франківської (верхня панель) та Сумської (нижня панель) областей на основі імплікації GNN (k = 1): коефіцієнти кореляції відображають зв'язок між нанесеною на карту площею виду в межах 20-кілометрового гексагону та його чисельністю	53
Малюнок 22 Прогнозовані та спостережені значення площі перетину насадження в Івано-Франківській (верхня панель) та Сумській (нижня панель) областях на основі моделі імплікації GNN (k = 3) (Миронюк та ін., 2022)	54

Список скорочень

BOA	Нижній шар атмосфери
CROBAS	Зростання дерев та площа крони з вуглецевого балансу
DCP	Ділянки збору даних
DEM	Цифрова модель висот
DSM	Цифрова модель поверхні
DTM	Цифрова модель рельєфу
EO	Спостереження за Землею
ESA	Європейське космічне агентство
FMP	Планування ведення лісового господарства/ лісовпорядкування
F-TEP	Лісова тематична експлуатаційна платформа
GIS	Географічна інформаційна система
HR	Висока роздільна здатність
NFI	Національна інвентаризація лісів
PREBAS	PRELES+CROBAS
PRELES	Прогнозування ефективності використання світла, випаровування та ґрунтових вод
RS	Дистанційне зондування
RMSE	Середньоквадратична похибка
SFE	Державне лісгосподарське підприємство
SFI	Впровадження сталого лісового господарства
SRTM	Радіолокаційна топографічна місія "Шаттл"
SWIR	Короткохвильовий інфрачервоний
TAO	Верхній шар атмосфери
VHR	Дуже висока роздільна здатність

Короткий огляд

Національна інвентаризація лісів (НІЛ) України, яка розпочалася у 2019 році, запланована як суто польова інвентаризація. Використання знімків дистанційного зондування передбачалося лише для попереднього уточнення, щоб визначити, чи знаходяться заплановані ділянки інвентаризації в межах лісу, чи ні.

Однак через війну в Україні національна інвентаризація лісів не може бути проведена у заплановані терміни. Окрім інших перешкод, таких як скорочення персоналу або нестабільна робота електромережі, значні ділянки лісу є недоступними через ризики для життя польових груп, спричинені окупацією, мінуванням або збройними конфліктами, що тривають в країні. Таким чином, кілька запланованих ділянок інвентаризації не можуть бути відвідані польовими командами. Тому було вирішено застосувати методи дистанційного зондування як допоміжний метод для оцінки структурних змінних лісів, зокрема, для важкодоступних лісових ділянок, а також для отримання більш детальних оцінок просторового розподілу змінних для всієї території України.

Метою цього дослідження є (i) створення основи для прийняття рішень щодо вибору методу аналізу даних дистанційного зондування, (ii) визначення необхідних кроків для збору та підготовки еталонних даних, а також (iii) розробка плану реалізації кроків, необхідних для оцінки структурних змінних лісів за допомогою даних дистанційного зондування. Відповідно до цих основних ідей, документ складається з трьох частин, кожна з яких залежить від результатів попередньої. Остаточні результати кожної частини будуть підготовлені у тісній співпраці з українськими партнерами проєкту та за погодженням з ними:

Частина I: Загальний огляд концепції

- Огляд методів та вимог до даних для застосування даних дистанційного зондування в контексті інвентаризації лісів
- Рекомендація відповідного методу та даних дистанційного зондування
- Визначення вимог до вихідних даних

Частина II: Збір, опис та аналіз наявних довідкових та допоміжних даних

- Опис наявних довідкових та допоміжних даних
- Концепція підготовки довідкових даних

Частина III: План впровадження

Частина I: Загальний огляд концепції

Використання аналізу даних дистанційного зондування для цілей лісової інвентаризації може принести користь процесу інвентаризації кількома способами. Тут основна увага приділяється прогнозуванню змінних структури лісу для недоступних лісових ділянок. Початкові плани польової НІА не зазнають суттєвих змін. Результати аналізу даних дистанційного зондування мають на меті створити додаткову цінну інформацію для НІА, таку як суцільне картографування змінних структури лісів, зі збільшеним просторовим розподілом, для всієї країни.

2.1. Вступ

Дистанційне зондування може надати кілька переваг для інвентаризації лісів, де ліси можуть бути великими і важкодоступними. Однією з ключових переваг є те, що воно дозволяє швидко та економічно ефективно збирати дані на великих площах. Дистанційне зондування також може надавати дані з високою роздільною здатністю, які можна використовувати для точного картографування та класифікації різних типів рослинності. Це може бути корисним для розуміння структури і складу лісу, для моніторингу таких змін, як лісовий покрив, життєздатність і здоров'я з плином часу. Крім того, дистанційне зондування може бути корисним для виявлення і пом'якшення наслідків стихійних лих та інших загроз.

Використання дистанційного зондування для підтримки польових обстежень при лісовій інвентаризації має кілька переваг. Однією з ключових переваг є те, що дистанційне зондування може забезпечити широкий огляд досліджуваної території, що може бути корисним для визначення ділянок, які можуть бути вартими подальшого дослідження в польових умовах. Якщо використовується регулярна сітка пробних ділянок, дистанційне зондування може допомогти визначити, які з них розташовані в межах лісу, а також оцінити доступність ділянки. Дані дистанційного зондування також можуть надати детальну інформацію про структуру і склад лісу, яка може бути використана для керівництва польовими дослідженнями і для забезпечення послідовного й систематичного збору даних. Це може допомогти підвищити точність і достовірність інвентаризації.

Дані дистанційного зондування з супутників можна використовувати для розрізнення різних типів рослинності в лісі на основі їхніх унікальних спектральних сигнатур, тобто довжин світлових хвиль, які відбиваються або випромінюються різними типами рослинності. Різні типи рослинності мають різні спектральні характеристики через відмінності в їхньому хімічному складі, структурі та фотосинтетичних пігментах, які виникають через різний стан листя, здоров'я, життєздатності тощо. На додаток до цих спектральних характеристик, супутникові дані також можна використовувати для визначення інших характеристик рослинності, таких як структура пологів, покрив крони, висота дерев, щільність дерев та видовий склад. Конкретні змінні, які можна

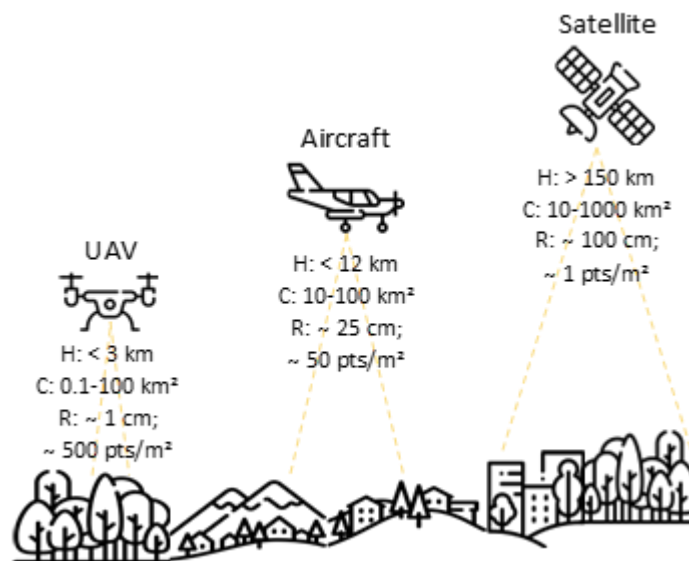
оцінити за допомогою дистанційного зондування, залежать від характеристик досліджуваного лісу та типу і роздільної здатності наявних супутникових даних.

Точність даних про структуру лісу, отриманих за допомогою дистанційного зондування, може змінюватися залежно від ряду факторів, включаючи тип використовуваної технології дистанційного зондування, роздільну здатність даних і тип досліджуваного лісу. Загалом, дистанційне зондування може надати високоточні дані про структуру лісу, якщо використовуються знімки з дуже високою роздільною здатністю (VHR) та високою роздільною здатністю (HR) і якщо досліджуваний ліс має відносно однорідні характеристики. Однак точність даних дистанційного зондування може знижуватися, коли йдеться про ліси зі складною структурою або коли роздільна здатність даних є недостатньою. Крім того, на точність даних дистанційного зондування можуть впливати такі фактори, як покриття території, хмарність і швидкі зміни в лісі з часом.

2.2. Вимоги до даних та методологічні можливості для підтримки НІЛ на основі ДЗЗ

2.2.1. Платформи та датчики дистанційного зондування

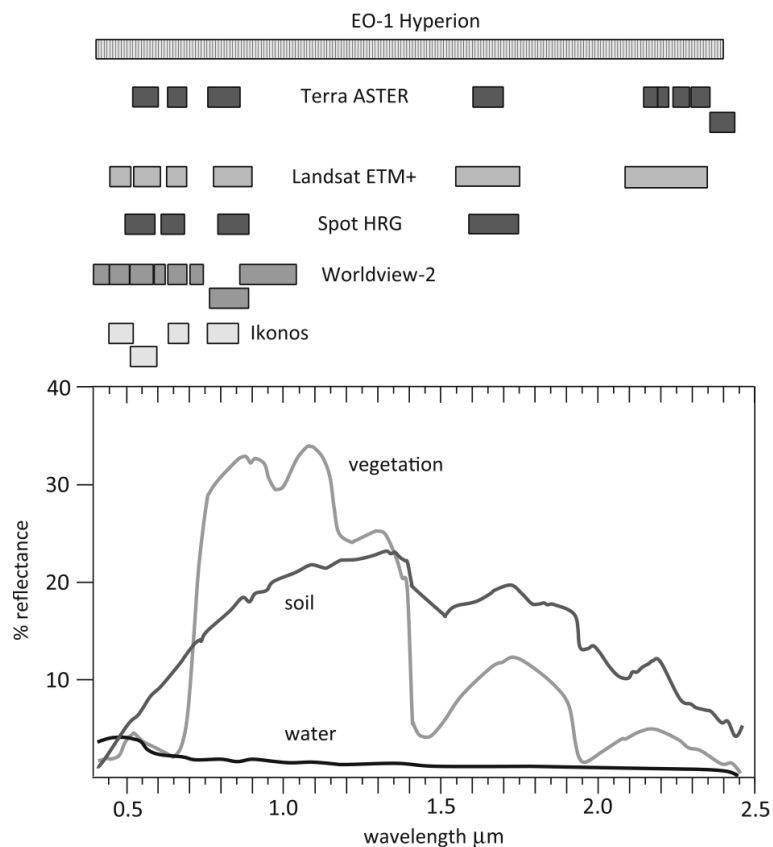
Для дистанційного зондування лісів виділяють три основні платформи: Безпілотні літальні апарати (БПЛА), літаки та супутники (див. мал. 1). Ці платформи можуть бути оснащені різними датчиками, які отримують дані з різними спектральними та часовими характеристиками.



Малюнок 1 Порівняння висоти польоту (H), покриття зображення (C) та просторової роздільної здатності (R; як відстані до землі (GSD) для мультиспектральних зображень, так і щільності точок для хмари точок LiDAR) платформ дистанційного зондування БПЛА, літака та супутника

Датчики, які реєструють і вимірюють електромагнітну енергію, поділяються на дві групи: пасивні датчики та активні датчики. Пасивні датчики, такі як камери, мультиспектральні або тепловізійні сканери, в основному покладаються на сонце як зовнішнє джерело енергії і, отже, залежать від сонячного освітлення для збору даних. Активні сенсори, такі як світлове виявлення і визначення дальності (LiDAR) або радіолокаційне виявлення і визначення дальності (RADAR), забезпечують власну енергію і, отже, не залежать від сонячного освітлення для збору даних.

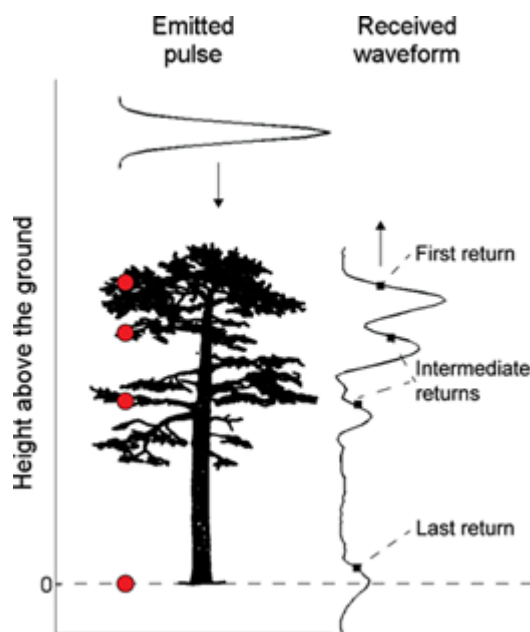
Пасивні датчики, що застосовуються в контексті лісової інвентаризації, зазвичай є мультиспектральними датчиками, які реєструють кілька спектральних діапазонів (довжин хвиль електромагнітної енергії) в діапазоні видимого світла та інфрачервоного випромінювання. Мультиспектральні датчики можуть вимірювати до 15 спектральних діапазонів (наприклад, порівняйте Worldview-2 на малюнку 2) і відрізняються від гіперспектральних датчиків, які можуть забезпечити більше 100 діапазонів (наприклад, порівняйте EO-1 Hyperion на малюнку 2).



Малюнок 2 Спектральні характеристики відбиття (внизу) у видимому (0,38 - 0,75 мкм), ближньому (0,75 - 1,4 мкм) та короткохвильовому інфрачервоному (1,4 - 3 мкм) діапазонах для трьох поширених типів земного покриття, показані разом з розташуванням спектральних діапазонів ряду поширених датчиків (вгорі), деякі з яких мають додаткові діапазони, що простягаються далі в інфрачервоному діапазоні, які тут не показані (Richards, 2013, S. 11)

З активних сенсорів LiDAR, що перекладається як Light Detection and Ranging (виявлення світла і визначення дальності), в основному використовується для отримання лісових показників. Як активна сенсорна система, LiDAR генерує власну

енергію (світло) або лазер, який випромінює імпульси (спалахи світлової енергії) і реєструє повторно повернуті сигнали. Час, за який сигнал повертається до датчика, використовується для розрахунку пройденої відстані. Система LiDAR використовує швидкість світла для обчислення відстані між вершиною об'єкта і платформою, що використовується. На основі орієнтації платформи і відстані, яку проходить світло, генерується 3D-хмара точок, кожна точка якої відображає потужність сигналу, що повертається. Відмінним фактором між системами LiDAR є спосіб запису зворотного сигналу (порівняйте Малюнок 3). Лідарні системи з дискретним поверненням визначають піки в поверненому сигналі і записують ці точки як повернення. Кількість повернень, що реєструються за один імпульс, зазвичай становить від 1 до 4, в основному реєструючи верхню частину покриття і поверхню землі. Повнохвильові LiDAR-системи фіксують розподіл світлової енергії, що повертається до датчика, і відображають його у вигляді хвильових форм (Малюнок 3). Хоча остання вимагає складної обробки, отримана інформація, порівняно з дискретними системами повернення, збільшує можливість виявлення дерев і чагарників у нижніх шарах лісу і покращує можливість класифікації деревних порід.



Малюнок 3 Повернутий дискретний сигнал (червоні точки) і форма сигналу випромінюваного імпульсу від системи LiDAR (Lindberg & Holmgren, 2017)

Рішення щодо платформи, яка використовується, та комбінації датчиків залежить від необхідної просторової та часової роздільної здатності, а також вартості збору даних. Хоча БПЛА або літаки, оснащені гіперспектральними або LiDAR-датчиками, полегшують аналіз даних на рівні одного дерева, їх використання в контексті НІЛ для суцільного картографування країни призведе до відносно високих витрат і збільшення часу збору даних порівняно з супутниковими знімками. Крім того, враховуючи війну, що триває в Україні, збір даних над зонами конфлікту за допомогою БПЛА або літаків не рекомендується через ризик нападу на платформи, що може призвести до втрати обладнання або навіть заповідання шкоди пілотам. Замість того, щоб охоплювати всю країну, дані з БПЛА або літаків можна також збирати за допомогою вибіркового

підходу, подібного до польових досліджень. Оскільки основна мета цього дослідження - запропонувати пропозиції щодо того, як отримати оцінки для нині недоступних лісових територій за допомогою даних дистанційного зондування, не змінюючи суттєво початкову концепцію HIA, наступні розділи будуть присвячені використанню супутникових знімків.

Інші активні датчики, які часто використовуються для дистанційного зондування, - це радіолокатори з синтезованою апертурою (SAR), які використовують мікрохвилі для створення двомірних зображень Землі. SAR-датчики на борту супутників забезпечують високу роздільну здатність, незалежність від денного світла і погодних умов, які можна використовувати для широкого спектру застосувань. Незалежність від погодних умов і денного світла робить SAR-датчики найбільш придатними для моніторингу, картографування небезпечних зон та інших застосувань, які потребують зображень, незалежних від хмарності. До цього часу, побудований на принципі радіолокатора (Range Detection and Ranging - виявлення і визначення дальності), він передбачає надсилання сигналу високої потужності до цілі і вимірювання сили (амплітуди) і часу (фази) зворотного відлуння від земної поверхні. Сигнал, що передається, взаємодіє з поверхнею Землі, і лише його частина розсіюється назад до датчика. Датчики SAR використовують поступальний рух своїх платформ (літаків або супутників) для синтезу більшої апертури, що дозволяє отримувати зображення з вищою роздільною здатністю. На відміну від оптичних зображень, візуалізація необроблених даних SAR не дає жодної корисної інформації про зображену місцевість, і для отримання 2D зображення у відтінках сірого необхідна обробка сигналу (Moreira, 2013). У той час як амплітуда SAR може надати інформацію про склад і характеристики об'єктів на зображеній ділянці, фаза SAR може надати інформацію про деформацію ґрунту і рельєфу місцевості. Датчики SAR працюють у мікрохвильовому діапазоні електромагнітного спектру світла від 0,3 ГГц до 40 ГГц, а отже, їхній роботі не заважають хмари та інші атмосферні явища. Найчастіше використовуються такі діапазони хвиль: X-діапазон (3,1 см), C-діапазон (5,6 см), L-діапазон (23 см) і S-діапазон (8-15 см). Дані SAR зазвичай бувають амплітудними і фазовими. Амплітудні дані SAR складаються з інформації про зворотне розсіювання SAR, відображеної на 2D-зображеннях, де зворотне розсіювання SAR від об'єктів на поверхні Землі залежить від різних геометричних властивостей і хімічних властивостей цих об'єктів. У контексті застосування в лісі, зворотне розсіювання SAR від рослинності буде залежати від вмісту рослинності, вологості ґрунту, листя і діелектричних властивостей цілей. Кількість переданих сигналів, що проникають крізь лісову рослинність, буде залежати від довжини хвилі, що використовується. Амплітуда SAR виявилася корисною для інвентаризації лісів, оскільки вона може надати інформацію про надземну біомасу і для моніторингу рослинності. Датчики SAR також дуже чутливі до води і, отже, можуть бути ефективними для аналізу вологості ґрунту. Поляриметрія SAR також широко використовується для аналізу ґрунтового покриву, що вимагає глибокого розуміння сигналу SAR і його взаємодії з об'єктами на зображенні, а також складних етапів обробки. Використання SAR для моніторингу лісів і біомаси детально описано в

посібнику NASA з використання SAR для моніторингу лісів і біомаси (SARHB_FullRes.pdf (servirglobal.net))

2.2.2. Вимоги до супутникових даних

Дистанційне зондування з використанням мультиспектральних та SAR супутників є економічно та часово ефективною альтернативою LiDAR даним та польовим обстеженням, особливо з огляду на поточну нестабільність в Україні. Супутникові дані можуть бути отримані пасивними та активними датчиками, тобто датчиками, які вимірюють кількість сонячного випромінювання, що відбивається від них, або датчиками, які генерують власну енергію і вимірюють потужність зворотних сигналів. З моменту запуску ERS-1 у 1972 році, який ознаменував початок ери спостереження Землі, було запущено багато супутників, як активних, так і пасивних, для різноманітних застосувань, включаючи моніторинг лісів і ґрунтового покриву. У той час як пасивні датчики на борту супутників залежать від умов денного освітлення і можуть заважати роботі через хмари, імлу та інші погодні явища, активні датчики, такі як RADAR, LiDAR і SAR, працюють незалежно від погодних умов і денної освітленості.

Мультиспектральні супутники

Для того, щоб мультиспектральні супутникові дані були корисними для інвентаризації лісів, вони повинні мати високу спектральну, часову, просторову роздільну здатність і не повинні бути обмеженими погодними умовами та хмарами.

- Спектральна роздільна здатність означає кількість різних довжин хвиль світла, які може виявити і виміряти супутниковий датчик. Для моніторингу лісів важливо мати можливість вимірювати світло, відбите в широкому діапазоні довжин хвиль (спектральних діапазонах), щоб можна було виявити широкий спектр особливостей лісу, таких як різні види рослинності, голий ґрунт і водні об'єкти.
- Часова роздільна здатність означає, як часто супутник отримує дані. Для інвентаризації лісів, щоб оцінити структурні дані лісу, важливо мати високу часову роздільну здатність, щоб знімки можна було отримати на момент часу, якомога ближче до дати вихідних даних. Крім того, завдяки аналізу часових рядів (багато знімків, отриманих протягом тривалого періоду часу), легше розрізнити види (композиції) дерев у лісі.
- Просторова роздільна здатність - це розмір найменшого елемента/об'єкта на місцевості (пікселя), який може виявити супутник. Для моніторингу лісів важливо мати високу просторову роздільну здатність, щоб можна було точно виявляти і відстежувати дрібні об'єкти в лісі, наприклад, окремі дерева.
- На додаток до цих технічних вимог, супутникові дані для моніторингу лісів також повинні збиратися за постійних і стабільних атмосферних умов, щоб забезпечити точність і надійність даних. Дані, зібрані під час великої кількості хмарності або інших атмосферних явищ, не підходять для такого дослідження.

Як показали Astola, Häme, Sirro, Molinier, & Kilpi (2019), порівнюючи знімки Sentinel-2 та Landsat 8 для прогнозування лісових змінних, загальнодоступні знімки вже можуть відповідати вищезазначеним вимогам. Sentinel-2 і Landsat 8 (або нещодавно запущений Landsat 9) - це два супутники з мультиспектральними датчиками на борту, а отже, наступний розділ присвячений лише мультиспектральним супутниковим знімкам.

Супутники SAR

Наразі існує багато супутників SAR, які надають відкритий доступ до своїх даних. Для цілей інвентаризації необхідно враховувати дві основні групи характеристик: характеристики сенсора і характеристики цілі. Характеристики сенсора включають в себе довжину хвилі, поляризацію радіолокаційного сигналу. Кут падіння радіолокаційного сигналу і напрямок орбіти супутника. Цільовими характеристиками є біомаса лісу та структурна складність.

- Довжина хвилі SAR: Довжина хвилі датчика визначає глибину проникнення переданого сигналу в рослинність або ґрунтовий шар землі. Чим довша довжина хвилі, тим глибше може бути проникнення. У лісовому господарстві,
 - X-діапазон (3,1 см) SAR-датчики в основному вимірюють зворотне розсіювання, що повертається від верхнього шару деревного покриву,
 - C-діапазон (5,6 см) SAR-датчики вимірюють зворотне розсіювання від верхівки та інших гілок і стебел дерев
 - L-діапазон (23 см) SAR-датчики зможуть вимірювати зворотне розсіювання від верхньої рослинності до поверхні землі



Малюнок 4 Пентація сигналів SAR відповідно до використовуваної довжини хвилі SAR (модифіковано з посібника NASA з SAR)

- Поляризація SAR: Дані SAR можуть збирати сигнали з різною поляризацією, збираючи і контролюючи поляризацію під час передачі та прийому. Поляризація - це орієнтація площини переданого радіолокаційного сигналу, найчастіше використовується горизонтальна (H) і вертикальна (V) поляризація. Орієнтація переданого радіолокаційного сигналу може змінюватися через взаємодію з різними елементами на місцевості, такими як рослинність, вода, ґрунт і т.д.. Таким чином, здатність SAR-датчика вимірювати цю зміну

поляризації може бути корисною при спробі зрозуміти породу дерев, тип культури, життєздатність рослинності і т.д. Такі датчики, як Sentinel-1, здатні надсилати сигнали лише в одній поляризації, або H, або V, і здатні приймати сигнали в обох напрямках, забезпечуючи таким чином подвійну поляризацію зображень у VV (Вертикальна передача, Вертикальний прийом) і VH (Вертикальна передача, Горизонтальний прийом), або HH і HV. Інші супутники SAR, такі як TerraSAR-X або ALOS-PALSAR, здатні надсилати дані в обох поляризаціях і приймати їх в обох напрямках, надаючи таким чином чотириполяризовані дані у форматах HH, VV, HV і VH. За допомогою низки складних методів декомпозиції можна отримати інформацію про породи дерев і сільськогосподарських культур, використовуючи техніку, яка називається SAR поляриметрія.

- Кут потрапляння SAR: Кут потрапляння - це кут між SAR-датчиком і похідною та нормаллю до освітлюваної поверхні Землі. Цей кут сильно впливає на зворотне розсіювання SAR і визначає розсіювання у верхніх шарах крони, стовбурах і взаємодію з землею. Об'єкти, нахилені до датчика, мають тенденцію повертати більше зворотне розсіювання, ніж ті, що нахилені від датчика.
- Орбіта SAR: SAR-сенсори спрямовані збоку, а не за Надіром (як оптичні датчики). Напрямок огляду SAR відноситься до спалаху, на який спрямована антена SAR під час випромінювання та прийому. Найчастіше SAR-датчики спрямовані праворуч, що означає, що частина Землі, яку вони знімають, буде праворуч від них. Коли супутники SAR знаходяться на висхідній орбіті, вони летять від північного полюса до південного і знімають ділянки праворуч від себе, тоді як та сама ділянка може бути знята, коли супутник знаходиться на низхідній орбіті (від північного полюса до південного). Об'єкти, нахилені до датчика під час висхідного знімання, можуть давати сильніше зворотне розсіювання, ніж під час низхідного знімання.

2.2.3. Вимоги до функцій

Більшість методів оцінки змінних структури лісу за даними дистанційного зондування ґрунтуються на методах апаратного навчання. У машинному навчанні властивість об'єкта, що аналізується, у нашому випадку даних дистанційного зондування, називається ознакою. Існує ряд ознак, які можна виділити з супутникових знімків для класифікації типів лісу та структурних змінних лісу. Ці ознаки можна використовувати для представлення спектральних, просторових і часових характеристик дерев, а також для навчання алгоритмів машинного навчання для розрізнення спектральних і просторових характеристик. Функції, важливі для аналізу даних дистанційного зондування, пов'язаних з лісом, можна згрупувати в три категорії:

- Спектральні характеристики: Це ознаки, які відображають спектральні характеристики дерев, такі як відбиття світла на різних довжинах хвиль,

нормалізований індекс різниці рослинності (NDVI) та індекс озеленення (the greenness index).

- Просторові характеристики: Це ознаки, які відображають просторові характеристики дерев, такі як розмір, форма і текстура дерев, а також розташування дерев у лісі.
- Часові ознаки: Це ознаки, які представляють часові характеристики дерев, такі як фенологічні стадії дерев (наприклад, поява листя, старіння листя) та сезонні зміни дерев.

На додаток до цих характеристик, отриманих з основних супутникових знімків, інші характеристики, такі як топографічні (наприклад, висота, схил), метеорологічні (наприклад, температура, вологість) та характеристики землекористування (наприклад, тип ґрунту, рослинний покрив) також можуть бути вилучені з додаткових супутникових даних і використані для підвищення точності аналізу.

2.2.4. Методи оцінки змінних структури лісу за даними дистанційного зондування

Застосування опублікованих методів

Оцінка змінних структури лісу за даними дистанційного зондування є сферою, яка активно досліджується, і в якій регулярно публікуються нові або оновлені методи. Особливо досягнення в галузі машинного навчання, зокрема штучних нейронних мереж, та нові джерела супутникових знімків є основними рушійними силами інноваційних розробок у цій галузі.

Багато досліджень дають дуже багатообіцяючі результати. Однак вони часто обмежуються конкретними досліджуваними територіями, а отже, конкретними типами лісів, і не перевіряються для більш загальних застосувань. Будь-який метод, запозичений з публікацій, повинен бути перевірений на його застосовність і модифікований відповідно до вимог, характерних для типів лісу в Україні. В ідеалі слід обирати методи, які були розроблені спеціально для українських лісів, наприклад, опубліковані Миронюком, Беллом, Грегорі, Василичиним та Білоусом (2022).

Описуючи розроблені методи, багато опублікованих робіт не надають доступу до використаного коду. Для того, щоб застосувати описані методи, необхідно їх реверс-інжиніринг. Це можна зробити або шляхом написання описаного коду в локальному середовищі розробки, як правило, на основі R або Python, що вимагає багато часу і зусиль, а успіх зворотного інжинірингу залежить від того, наскільки добре методологія була описана в публікації. Обробка даних для цілої країни пов'язана з високими локальними витратами на обробку та зберігання, що може обмежити цей варіант, роблячи хмарне рішення, таке як використання [Google Earth Engine](#), кращим.

Для зменшення часу та витрат на написання коду при відтворенні методів, описаних у публікаціях, їх також можна реалізувати за допомогою безкодових сервісів для аналізу

даних дистанційного зондування, таких як [Earth Blox](#). Однак ці сервіси обмежені в доступних функціональних блоках і, таким чином, можуть не забезпечити необхідну функціональність для відтворення складних робочих процесів, таких як глибокі нейронні мережі з дуже специфічними прихованими шарами.

Використання існуючих сервісів

Як це часто буває в наукових дослідженнях, основна увага приділяється розробці та тестуванню нових методів, а не створенню готових інструментів, тому існує лише декілька готових інструментів для оцінки структурних змінних лісу за даними дистанційного зондування. Одним з них, який пропонується як найбільш прийнятний підхід і більш детально описаний нижче, є [Forest Flux](https://cordis.europa.eu/project/id/821860) (<https://cordis.europa.eu/project/id/821860>). Розробка сервісу стала результатом проекту, що фінансується ЄС, до якого долучилася компанія *unique*, яка змогла зібрати досвід у кількох пілотних дослідженнях. Він також знаходиться на стадії подальшого розвитку в рамках проекту "Моніторинг лісового вуглецю" [Forest Carbon Monitoring](#).

Forest Flux надає хмарні сервіси для прогнозування структурних змінних лісів та асиміляції вуглецю за допомогою вільно доступних даних спостереження за Землею (ДЗ) з високою роздільною здатністю (HR) (Häme, et al., 2021). Результати генеруються у вигляді цифрових карт та статистичної інформації. Основним джерелом даних ДЗ є знімки супутника *Satellite*, надані Європейським космічним агентством (ЄКА). *Forest Flux* дотримується цілісного підходу, реалізованого в єдиному технологічному ланцюжку. Послуги *Forest Flux* реалізовані на платформі тематичної експлуатації лісового господарства (F-TEP) і повністю функціонують з 2022 року (Häme, et al., 2022). F-TEP пропонує широкий спектр послуг для підтримки комерційних, державних та науково-дослідних установ у лісовому секторі. Через F-TEP в режимі онлайн доступні різноманітні підходи до обробки даних для створення інформаційних продуктів для управління та моніторингу лісового господарства.

У Частині 6 описані кроки обробки даних для *Forest Flux*. Ці кроки є досить загальними, щоб їх можна було виконати, якщо буде прийнято рішення про відмову від платформи.

2.3. Рекомендовані процеси

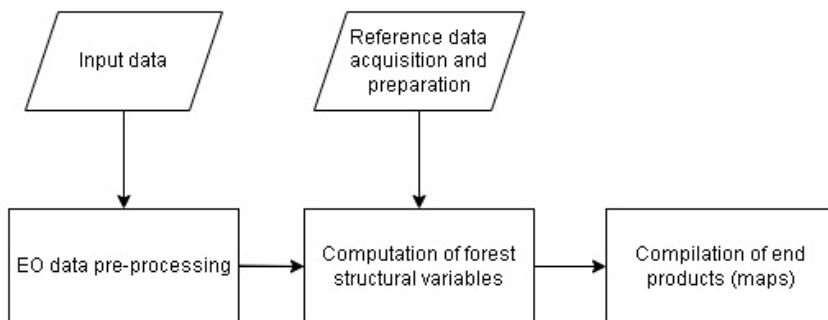
У наступних розділах описано рекомендований ланцюжок обробки для оцінки структурних змінних лісу за допомогою ДЗ та окреслено відповідні підсистеми, які необхідно модифікувати (на основі рекомендації щодо використання та адаптації сервісів *Forest Flux*, доступних на платформі F-TEP). Тут і далі ми зосереджуємося лише на використанні мультиспектральних даних *Sentinel-2* та даних VHR інших місій, таких як *PlanetScore*. Більш детальний опис підходів, алгоритмів, що лежать в основі, та їх застосування наведено у фінальному звіті *Forest Flux* (Häme, et al., 2022).

2.3.1. Загальний операційний ланцюжок

Схематичний огляд всього технологічного ланцюга, який буде реалізовано, показано на Рисунку 4. Основний технологічний ланцюг складається з трьох підсистем:

1. Попередня обробка даних ДЗЗ (HR та дуже високої роздільної здатності (VHR) ДЗЗ),
2. Виділення/обчислення структурних змінних лісу та
3. Компіляція очікуваних кінцевих продуктів.

Для отримання бажаних картографічних продуктів (вихідних даних) необхідні вхідні дані для конкретної території та еталонні дані.



Малюнок 5. Схематичний огляд ланцюжка обробки даних прикладних сервісів Forest Flux (Häme, et al., 2022)

У підсистемі "**Попередня обробка даних спостережень Землі**" набори даних спостережень Землі (Sentinel-2) обробляються до рівня, необхідного для наступної підсистеми обробки. За замовчуванням розмір пікселя становить 10 м, що є найвищою просторовою роздільною здатністю даних Sentinel-2. Тут також будуть використовуватися допоміжні набори даних. Підсистема "**Обчислення структурних змінних лісу**" створює шари продукту лісової інвентаризації. Після того, як ця підсистема завершила обробку, шари продукту готові для компіляції кінцевого продукту.

Ця підсистема також включає "**збір та підготовку довідкових даних**" із супутникових знімків VHR, аерофотознімків або відкритих даних VVHR-зображень, таких як Google Maps, Bing Maps і т.д.

Третя підсистема "**Компіляція кінцевих продуктів**" компілює шари продукту в остаточні формати для доставки. Вона включає стилізацію, форматування або кольорове кодування на основі визначених таблиць пошуку та перетворення форматів відповідно до національних вимог.

Основні очікувані кінцеві продукти (вихідні карти) для інвентаризації лісів на основі ДДЗ для України були отримані з переліку результатів, визначених для наземної НІЛ.

Очікувані продукти наведені в Таблиці 1 разом з можливими джерелами довідкових даних відповідно до рівня їх доступності. Довідкові дані можна отримати на трьох рівнях:

- Рівень 1: Оцінки атрибутів на основі візуальної інтерпретації зображень дуже високої роздільної здатності (VHR) (аерофотознімки, зображення Google Earth або Bing Maps). Рівень 1 завжди буде необхідним для покращення якості результатів або для перевірки і розмежування опорних даних з джерел рівнів 2 і 3.
- Рівень 2: Еталонні полігони, що містять наземні та деревостанові структурні атрибути лісу на основі останніх (< 5 років) даних Плану управління лісами (ПУЛ).
- Рівень 3: Перелік наземних атрибутів, відібраних у польових умовах з ділянок НІА (ДСР) Адміністративні дані (дороги, річки)

Таблиця 1 Огляд очікуваних кінцевих продуктів та джерел довідкових даних для підготовки моделі аналізу ДЗЗ

Очікувані кінцеві продукти - отримані рівні мапи	Цільове використання референтних даних		
	Рівень 1: Оцінки атрибутів на основі візуальної інтерпретації зображень дуже високої роздільної здатності (VHR)	Рівень 2: Атрибути, вибрані з актуальних (< 5 років) даних FMP (лісовпорядкування) + зображень VHR	Рівень 3: Перелік наземних атрибутів, необхідних для картографування ДЗЗ (достовірність наземних даних)
Маска лісів (карта лісового покриву з просторовою роздільною здатністю 10 м)	Ліс / не ліс	Ліс / не ліс	Ліс / не ліс
Типи лісу	Типи лісу	Тип лісу & Покращено склад деревних порід на рівні деревостану шляхом аналізу зображень VHR	Тип лісу & Породний склад лісу на рівні ділянки
Поширення деревних порід (растрові карти наявності та поширення деревних порід з просторовою роздільною здатністю 10 м)	Частково аплікативні - домінуючі види	Відсоток деревних порід від даних про рівень деревостану, покращений за допомогою аналізу зображень VHR	Лісові породи дерев % на рівні ділянки
Середня висота дерева [м]	NA	Середню висоту дерев на основі даних про рівень деревостану покращено за допомогою аналізу зображень VHR	Середня висота дерев на рівні ділянки
Середній DBH [см]	NA	Див.вище	Див.вище
Густота - кількість дерев [N/га]	NA	Див.вище	Див.вище
Площа поперечного перерізу [м ² /га]	NA	Див.вище	Див.вище
Середній вік [роки]	NA	Див.вище	Див.вище
Середній ростучий запас [м ³ /га]		Середній запас /га від рівня деревостану, покращений за допомогою аналізу зображень VHR	Середній запас /га на рівні ділянки
Приріст / га	NA	Приріст /га від даних рівня деревостану від даних рівня деревостану, покращених шляхом	Приріст /га на рівні ділянки

Очікувані кінцеві продукти - отримані рівні мапи	Цільове використання референтних даних		
	Рівень 1: Оцінки атрибутів на основі візуальної інтерпретації зображень дуже високої роздільної здатності (VHR)	Рівень 2: Атрибути, вибрані з актуальних (< 5 років) даних FMP (лісовпорядкування) + зображень VHR	Рівень 3: Перелік наземних атрибутів, необхідних для картографування ДЗЗ (достовірність наземних даних)
		аналізу зображень VHR	
Наземна та підземна біомаса/ га	NA	Наземна та підземна біомаса /га з даних насаджень, покращених шляхом аналізу зображень VHR	Наземна та підземна біомаса/га на рівні ділянки
Запас вуглецю [т/га]	NA	Див.вище	Див.вище

2.3.2. Вхідні дані

2.3.2.1. Супутникові знімки високої роздільної здатності – Sentinel-2

Вхідні дані складаються з даних спостережень Землі високої роздільної здатності та допоміжних даних. Основним рекомендованим джерелом даних спостережень є мультиспектральні зображення Copernicus Sentinel-2, які охоплюють 13 спектральних діапазонів. Чотири з них мають просторову роздільну здатність 10 м (синій, зелений, червоний і ближній інфрачервоний), шість - 20 м і три - 60 м. 10-метрові діапазони слугують основним джерелом даних, але за потреби можна використовувати й інші діапазони. На додаток до 10-метрового діапазону, основними 20-метровими діапазонами, що використовуються, є короткохвильовий інфрачервоний (SWIR) і червона гранична смуга 5 (Таблиця 2). Дані Sentinel-2 надаються у вигляді плиток розміром 100 км на 100 км і доступні на двох рівнях обробки: Ортознімки рівня 1С та ортознімки рівня 2А з атмосферною корекцією. Це означає, що зображення рівня 1С містять значення відбиття у верхній частині атмосфери (TOA), а дані рівня 2А - значення відбиття в нижній частині атмосфери (BOA). Основним джерелом даних будуть дані Sentinel-2 рівня 2А. На основі карт класифікації сцени складаються маски хмар і хмарних тіней, які базуються на даних з високим рівнем обробки. У таблиці 2 наведено спектральні діапазони Sentinel-2А з відповідною просторовою роздільною здатністю.

Таблиця 2 Діапазони, що застосовуються в Sentinel-2A

Діапазон		Центральна довжина хвилі (µm)	Просторова роздільна здатність (m)
B2	Блакитний	0.492	10
B3	Зелений	0.560	10
B4	Червоний	0.665	10
B5	вегетація на межі червоного	0.704	20
B6	вегетація на межі червоного	0.741	20
B7	вегетація на межі червоного	0.783	20
B8	NIR (ближнє інфрачервоне світло)	0.833	10
B8A	вегетація на межі червоного	0.865	20
B11	SWIR (короткохвильове інфрачервоне світло)	1.614	20
B12	SWIR (короткохвильове інфрачервоне світло)	2.202	20

2.3.2.2. Допоміжні дані

Допоміжні дані включають всі інші набори даних ДЗЗ, необхідні для створення вихідних карт. Основними допоміжними даними, необхідними для попередньої обробки даних спостережень Землі, є: а) цифрові моделі рельєфу (ЦМР) і б) топографічні карти. Очікується, що для супутникових знімків високої роздільної здатності не потрібно повторно проводити орторектифікацію. Однак для обробки зображень VHR (дуже високої чіткості) орторектифікація за допомогою ЦМР часто є необхідною. Тому зараз для rs-NFI від українських партнерів запитується оптимальна доступна площа ресурсів ЦМР. У випадку, якщо кращої національної ЦМР немає, глобальна ЦМР, отримана за допомогою радіолокаційної топографічної місії "Шаттл" (SRTM) (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) є гідною глобальною альтернативою. Крім того, глобальна 3D модель рельєфу від місії TanDEM-X (<https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tm90/>) знаходиться у вільному доступі для наукового використання. Роль топографічних карт полягає, головним чином, у забезпеченні якості наборів даних, особливо, коли використовуються ДЗЗ VHR. На додаток до картографічних даних, якщо офіційні національні дані недоступні, можна використовувати дані Google Maps, Google Earth, Bing Maps та Open Street Map.

2.3.3. Референтні дані

Основним джерелом даних для підсистеми 2) обчислення структурних змінних лісу (див.Малюнок 4) є попередньо оброблені супутникові знімки високого розрізнення, отримані в результаті роботи підсистеми 1). Крім того, необхідні польові довідкові дані про змінні, що підлягають оцінюванню. Оскільки часова, геометрична і тематична точність польових вихідних даних впливає на точність відповідного продукту, вихідні дані повинні бути високоточними і доступними для кожної цільової змінної. Отже, доступність вихідних даних може обмежувати вибір кінцевих продуктів. Еталонними даними можуть бути геокодовані дані пробних площ, векторні дані деревостанів, отримані з FMP (лісовпорядкування) або інших карт. Там, де це необхідно, будуть застосовані обчислення та перетворення форматів.

Змінні, необхідні для навчання класифікатора даних дистанційного зондування для структурних змін лісу, включають інформацію як про ділянку, так і про структуру лісу. Важливо, щоб довідкові дані були надані у стандартизованому вигляді, включаючи короткий опис процесу збору та контексту (наприклад, ділянки FMP, NFI). У наступній Таблиці 3 наведено перелік змінних разом з очікуваним форматом/одиноцею та коротким описом, найважливіші з яких виділено жирним шрифтом.

Таблиця 3 Довідкові дані змінної лісової структури

Назва змінної	Формат/Одиниця	Опис
Рік даних	ціле число (Integer)	Рік збору даних
Тип даних	Категорійна змінна	Тип референтних даних, ціле число як категорія: 1. кругова ділянка 2. деревостан 3. реласкопічна ділянка 4. інше
Центр ділянки - схід	м	Координата X у референтній системі координат UTM В описі повинен бути вказаний EPSG код системи координат UTM.
Центр ділянки - північ	м	Координата Y в системі координат UTM В описі повинен бути вказаний EPSG код системи координат UTM.
Площа ділянки або деревостану	м ²	Якщо це багаторадіусний полігон, вкажіть площу, що відповідає найбільшому радіусу. Значення -1 для реласкопічного полігону.
Тип ґрунту	Категорійна змінна	Визначення конкретного типу ґрунту 1. мінеральні 2. органічні Для категорій слід надавати умовні позначення. Якщо детальна інформація недоступна (наприклад, з карт ґрунтів), принаймні, слід розрізняти мінеральні та органічні ґрунти (торф).

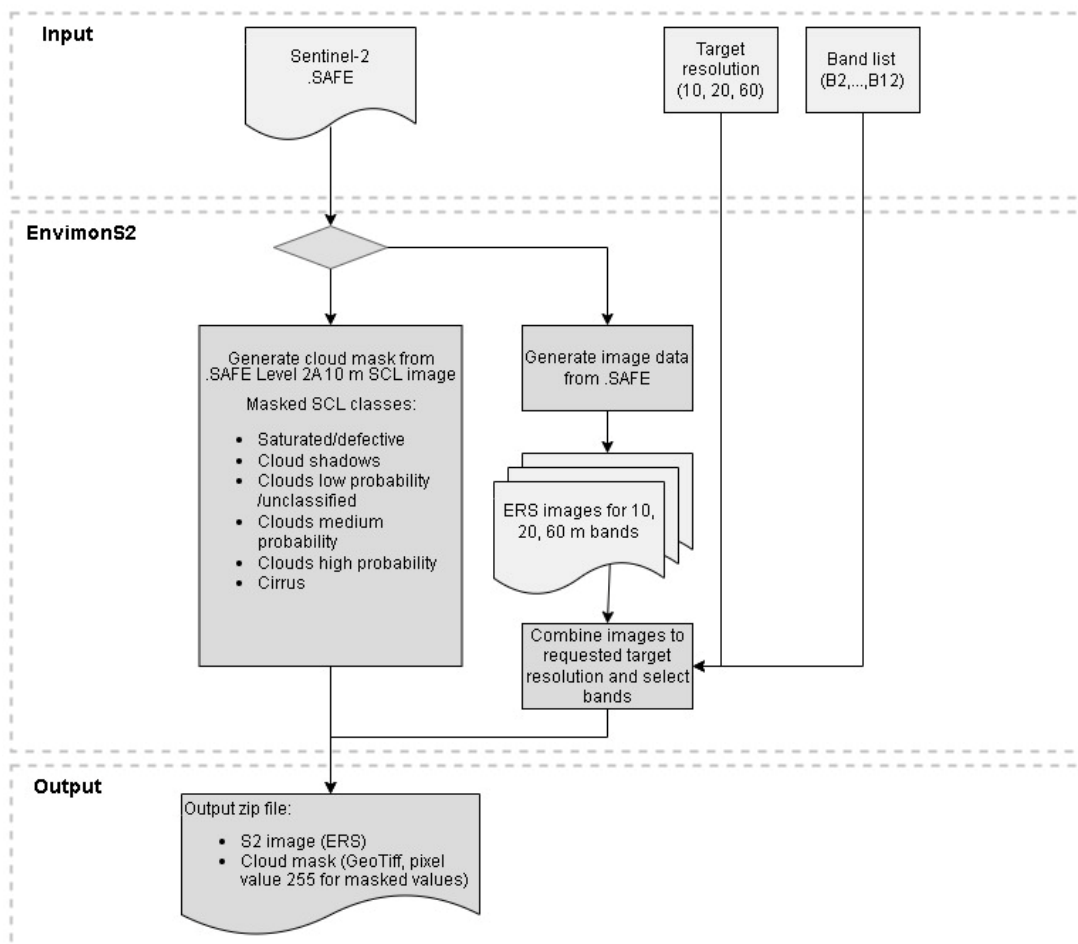
Назва змінної	Формат/Одиниця	Опис
Індекс ділянки	м	h100: Висота (гіпотетична) лісу у метрах у віці 100 років з ідеальними видами дерев Якщо h100 недоступно, можна використовувати подібні класи індексів ділянок.
Ярус	Категорійна змінна	Кількість вертикальних ярусів у лісі, ціле число як категорія: 1. одновікові 1. 2 яруси 2. 3 ярус 3. різновікові Якщо визначені одиниці не можуть бути вказані у звіті, можна використовувати подібні класи.
Тип лісу	Категорійна змінна	Визначення конкретного типу лісу, ціле число як категорія: Якщо відсутня детальна або актуальна інформація у вигляді карт, принаймні, можна застосувати наступні категорії екорегіонів (Dinerstein, et al., 2017): Центральноєвропейські мішані ліси Кримський субсередземноморський лісовий комплекс Східноєвропейський лісостеп Паннонські мішані ліси Карпатські гірські хвойні ліси Понтійський степ Для категорій слід навести умовні позначення. Детальна карта типів лісів для всієї України також може бути створена за допомогою методів Д33
Розподіл деревних порід:		
Види 1	%	Частка деревної породи 1 за площею основи, включаючи всі яруси. Визначити види дерев та кодування з наданням вихідних даних. Співвідношення видів повинно складати 100 %.
Види 2	%	Частка деревних порід 2 за площею основи, включаючи всі шари. Визначити види дерев та кодування з наданням вихідних даних. Співвідношення порід повинно складати 100 %.
Види n	%	Частка деревних порід n за площею основи, включаючи всі рівні Визначити види дерев та кодування з наданням вихідних даних. Співвідношення порід повинно складати 100 %.
Середня висота	м	Середня висота площі поперечного перерізу, включаючи всі види та прошарки
Середній діаметр	см	Середній діаметр площі поперечного перерізу на висоті грудей, включаючи всі види та шари
Густота	n/га	Кількість деревостанів на гектар, включаючи всі види дерев та яруси
Площа поперечного перерізу	м ² /га	Площа поперечного перерізу стебел на гектар для всієї ділянки, включаючи всі види та яруси

Назва змінної	Формат/Одиниця	Опис
Середній вік	роки	Середній показник на рівні деревостану або ділянки для основного ярусу або домінуючого виду
Середній ростучий запас	м³/га	Обсяг деревостану на гектар, включаючи всі породи та яруси
Біомаса	Т сухої речовини/га	AGB та BGB на гектар, включаючи всі види та яруси
Запас вуглецю	т/га	Вміст вуглецю в біомасі або еквівалент CO2 на гектар
Густота крони	%	Проектована площа крон дерев у пропорції до площі ділянки або деревостану
Пошкодження	%	Частка пошкодженого лісу на площі ділянки або деревостану.

2.3.4. Попередня обробка супутникових знімків

Метою попередньої обробки є створення знімків Sentinel-2, готових для обробки та аналізу. Застосовані методи рекомендованого сервісу Forest Flux для ланцюжка обробки створюють дані зображення у форматі, безпосередньо сумісному з ланцюжком обробки, разом з масками, які ідентифікують пікселі, що не є корисними для подальшої обробки (наприклад, маска хмар і тіней від хмар). Оскільки ланцюжок обробки сервісу Forest Flux використовує зображення ER Mapper як внутрішній формат, на виході будуть створюватися переважно зображення ER Mapper. У випадку, якщо маску хмар і тіней необхідно переглянути вручну, створюється додатковий файл у форматі GeoTiff, який можна обробити в будь-якому локальному програмному забезпеченні GIS.

Зображення HR Sentinel-2 вибираються інтерактивно за допомогою інструменту пошуку F-TEP. Потім вибране зображення приймається як вхідний файл інструментом EnvimonS2 (Мал. 6), реалізованим у F-TEP. Сервіс EnvimonS2 розпаковує зображення Sentinel-2 з zip-архіву у формат ER Mapper (.ers). Доступні варіанти розміру пікселів: 10 м, 20 м і 60 м. Для зображень рівня 2A маска хмар витягується з класифікаційного зображення сцени з роздільною здатністю 20 м, отриманого в результаті обробки рівня 2A. Результатом є файл у форматі GeoTiff зі значеннями пікселів 255 для класів насиченість/дефекти, хмарні тіні, хмари (низька/середня/висока ймовірність) і перистість та значенням 0 для інших класів. Результатом етапу попередньої обробки є zip-файл, який містить смуги зображення Sentinel-2 з вибраним розміром пікселів та одну маску хмарності. Блок-схема попередньої обробки даних високої роздільної здатності HR наведена на Малюнок 1.



Малюнок 1 Блок-схема попередньої обробки супутникових знімків HR (Häme, et al., 2022)

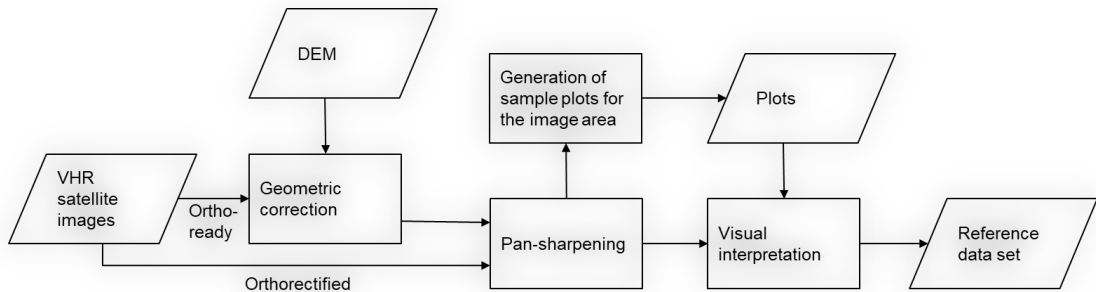
В якості альтернативи ми можемо реалізувати кроки попередньої обробки за допомогою інструменту обробки Sen2Cor, наданого ESA. Sen2Cor також створює індикатори ймовірності хмарності та снігу, а також маску хмарності та тіні від хмарності. Маска і ймовірність хмарності об'єднуються в початковий варіант маски хмарності, який потім інтерактивно оцінюється в GIS програмі і допрацьовується вручну. Для візуальної перевірки з кожного зображення Sentinel-2 створюються жибні та істинні кольорові зображення.

2.3.4.1. Попередня обробка зображень

Джерело вихідних даних рівня 1, яке використовується як додаткове джерело інформації в поєднанні з даними рівнів 2 і 3, особливо актуальне також для всіх недоступних територій, де недостатньо вихідних даних рівнів 2 і 3. На цьому етапі попередньої обробки описано використання зображень дистанційного зондування VHR, таких як аерофотознімки, супутникові знімки, зображення з відкритих даних з Google або Bing Maps. Зображення VHR використовуються для візуальної інтерпретації цільових атрибутів, таких як ліс / не ліс або тип лісу, вікові класи тощо, і дозволяють вибрати і окреслити однорідні опорні полігони з джерел рівня 2 і 3.

Метою попередньої обробки є створення набору даних, з якого можна вилучити еталонні дані як для класифікації земного покриву, такі для моніторингу змін. Для цього потрібно, щоб зображення були правильно орторектифіковані та придатні для візуальної інтерпретації.

Малюнок 2 наведено огляд відповідного ланцюжка обробки від зображень VHR до ретроспективних опорних даних.



Малюнок 2 Ланцюжок попередньої обробки супутникових знімків (Häme, et al., 2022)

Для зображень, отриманих як ортотрансформовані, істинні та хибні кольори розраховуються за допомогою панорамного підвищення різкості. Для зображень, отриманих у вигляді готового ортофотоплана, перед панорамуванням виконується орторектифікація з використанням наявної матриці висот і вибірки найближчих точок. Після попередньої обробки опорні дані збираються за допомогою візуальної інтерпретації. Атрибути перезаписуються дистанційно для кожної ділянки відповідно до експертної оцінки з використанням зображень VHR та GIS. Цей процес полегшується за допомогою допоміжного інструменту, який забезпечує швидку навігацію між зразками та їх оцінку, а також простий запис відповідних значень атрибутів.

2.3.4.2. Виведення результатів попередньої обробки даних спостереження за Землею (EO)

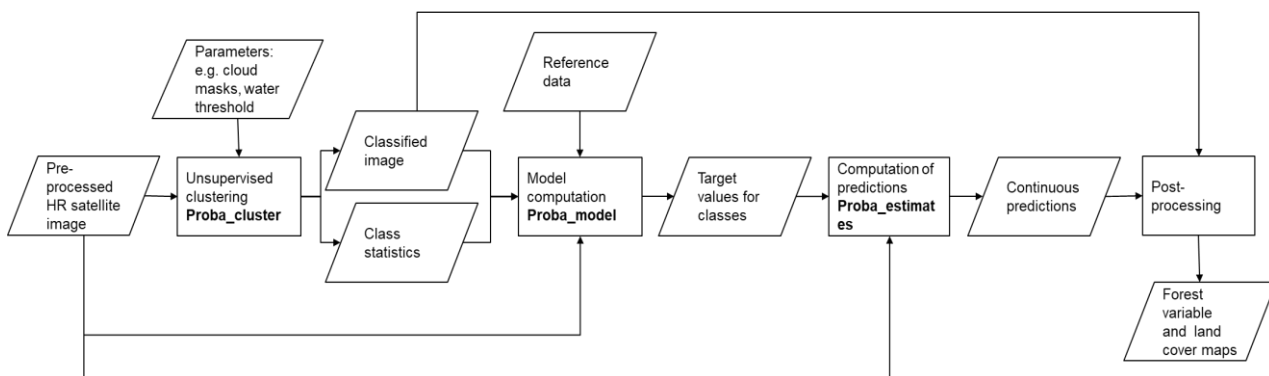
Вихідні дані підсистеми попередньої обробки даних EO складаються з наступних елементів:

- Попередньо оброблені зображення від стіни до стіни
- Істинна кольорова мозаїка з даних від стіни до стіни
- Хибна кольорова мозаїка з об'ємних даних
- Істинна кольорова мозаїка із зображень VHR
- Хибна кольорова мозаїка із зображень VHR
- Набори еталонних даних, зібрані з VHR-зображень

Розмір пікселя об'ємних зображень у випадку Sentinel-2 становить 10 метрів, а для супутникових знімків VHR - розмір пікселя відповідної панхроматичної смуги зображення.

2.3.5. Обчислення структурних змінних лісу

Основними компонентами підсистеми 2) Обчислення структурних змінних лісу, включаючи класифікацію земного покриття, є алгоритми програмного забезпечення Probability chain (*Proba_cluster*, *Proba_model*, *Proba_estimates*), які визначають нелінійне відображення з багатовимірного вхідного простору (значення відбивної здатності) у багатовимірний простір класифікації вихідних змінних, використовуючи EO та довідкові дані. Програмне забезпечення Probability chain було надано на основі розробки фінського Центру технічних досліджень VTT і досі підтримується VTT. Ланцюжок обчислень дає оцінки ймовірностей для всіх змінних лісів, для яких доступна довідкова інформація. На додаток до програмних інструментів ланцюжка ймовірностей, ланцюжок включає етап постобробки для застосування масок до зображень оцінок і, у випадку класифікації категорій, складання остаточної класифікації на основі шарів безперервних оцінок. Малюнок 3 представлено схематичний огляд відповідної підсистеми.



Малюнок 3 Обчислювальний ланцюжок для прогнозування лісових змінних та класифікації земного покриття (Häme, et al., 2022)

Оцінка ймовірності базується на алгоритмах, описаних в Häme et al., 2001. Спочатку виконується неконтрольована кластеризація в просторі ознак зображення з використанням алгоритму k-середнього значення за допомогою інструменту *Proba_cluster*. В результаті створюються класи ознак (зазвичай від 30 до 50), а також відповідні статистичні дані та параметри нормального розподілу для кожного класу. Для кожного класу ознак визначаються значення цільових змінних, використовуючи вихідні дані та інструмент *Proba_model*. *Proba_model* може використовувати еталонні дані у форматі таблиць, графіків або зображень. На останньому кроці оцінки ймовірності за допомогою інструменту *Proba_estimates* обчислюються прогнози змінних як зважена сума цільових значень усіх класів ознак. Присвоєні значення відповідають ймовірностям належності пікселя до кожного класу ознак. Основний принцип оцінки ймовірності полягає в тому, що всі змінні розглядаються як неперервні. Однак цей метод може бути використаний і для задач класифікації земного покриття. Коли метод оцінки ймовірності застосовується для класифікації, класи категорій вихідних даних спочатку перетворюються на безперервні змінні, в результаті чого, наприклад, значення пікселів еталонної карти лісових і нелісових територій дорівнюють 0 або 100%. На завершальному етапі класифікація категорій створюється на основі безперервних прогнозів з використанням класифікації на основі правил. Також

можна безпосередньо позначити класи ознак, створені Pro-ba_cluster, категоріями, використовуючи еталонні дані або інтерактивно, використовуючи візуальну інтерпретацію вихідних даних або супутникових знімків VHR. Інструмент proba_estimates обчислює попередній прогноз для кожної цільової змінної для кожного пікселя зображення. Наприклад, для карт лісового покриття значення ймовірності прогнозу в діапазоні від 0 до 100% присвоюються кожному пікселю на повторному зображенні. В результаті, кожен піксель віднесено до класу, частка якого є найбільшою. Якщо для класифікації категорії використовується декілька класів, застосовується ієрархічний підхід. У випадку з об'ємом вегетативної маси кожному пікселю присвоюється прогнозоване значення об'єму стовбура в кубічних метрах на гектар. Крім того, пікселі, покриті хмарами, водою та сільськогосподарськими угіддями, отримують прогноз змінної лісистості, якщо вони не були замасковані та не отримали NULL значення під час попередньої обробки. Для неперервних змінних лісу модуль постобробки маскує всі класи, які не слід враховувати при прогнозуванні змінних лісу, тобто пікселі, що не є лісом.

2.3.6. Складання кінцевих продуктів (карт)

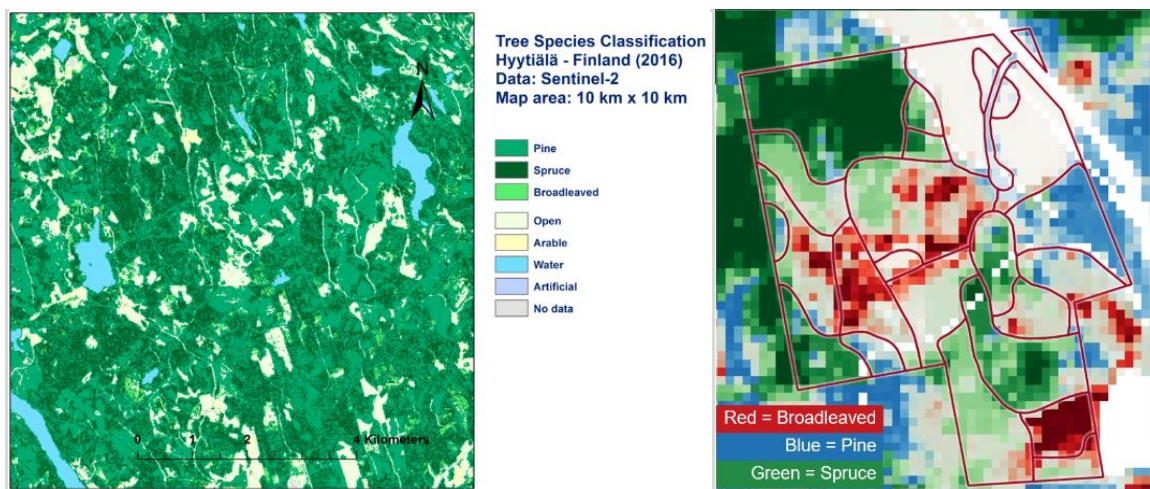
Оцінки очікуваних структурних змінних лісу здійснюються за допомогою "інструменту інвентаризації лісів". Інструмент інвентаризації лісів створює один шар для кожної визначеної змінної або категорії лісу, для якої доступні еталонні дані. За замовчуванням розмір пікселя створених карт становить 10 м для даних Sentinel-2. Значення кожного пікселя безпосередньо відповідає оціночному значенню змінної або класу кодової категорії.

В якості набору продуктів можуть бути оброблені наступні цільові безперервні просторові шари (карти) змінних лісів для всієї території України - кожен з роздільною здатністю 10 м:

- Лісова маска або карта лісового покриття
- Карти поширення деревних порід
- Карта типів лісу
- Середня висота дерева [м]
- Середній діаметр дерева [см]
- Кількість стовбура/густота [шт. /га]
- Площа поперечного перерізу [м²/га]
- Середній вік [роки]
- Середній запас [м³/га]
- Приріст [м³/га]
- Надземна та підземна біомаса [t dry т сухої речовини / га]
- Запас вуглецю [т/га]
- Зімкнутість крони / Загальний відносний запас [%]

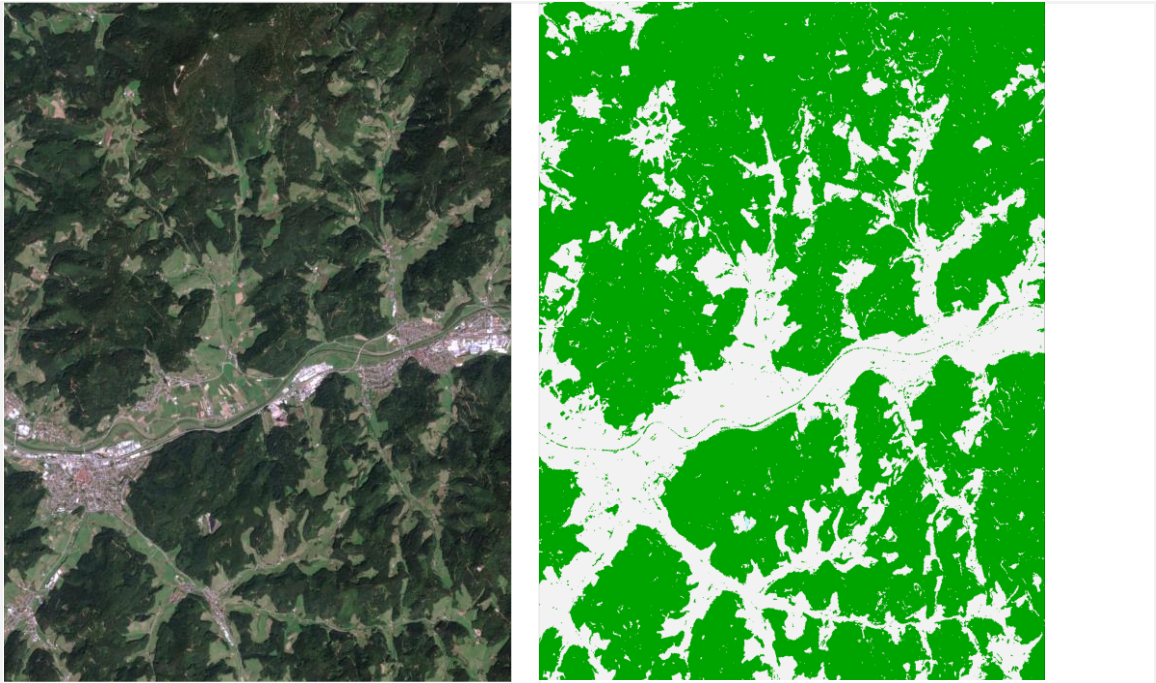
Приклади кінцевих продуктів та рівні потенційної точності

Нижче ми наводимо деякі приклади кінцевих продуктів і описуємо, яких рівнів точності можна досягти на основі досвіду нашого проєкту Forest Flux, а також попередніх досліджень, проведених переважно у Скандинавії. Згідно з досвідом роботи з сервісом обробки даних Forest Flux, загальна точність дискретних змінних становить близько 70-95%, залежно від кількості класів, отриманих в рамках пілотних досліджень під час проєкту Forest Flux, а також у попередніх дослідницьких проєктах у Скандинавії. На малюнку 9 наведено приклади дискретних класифікацій земного покриття та деревних порід на основі даних Sentinel-2 з Фінляндії. Для неперервних змінних середньоквадратична похибка (СКП) на рівні ділянки досягає приблизно 30-60% від середнього значення, залежно від змінної, про яку йдеться (Astola et al. 2019). На практиці помилки на рівні ділянки мають тенденцію зрівноважувати одна одну, що призводить до все більш точних оцінок у міру того, як збільшується площа, що нас цікавить. Відхилення, як правило, є дуже низьким, що свідчить про те, що в середньому оцінки дуже близькі до реальності. Це формує міцну основу для надійних оцінок структурних змінних лісу для території, що нас цікавить.



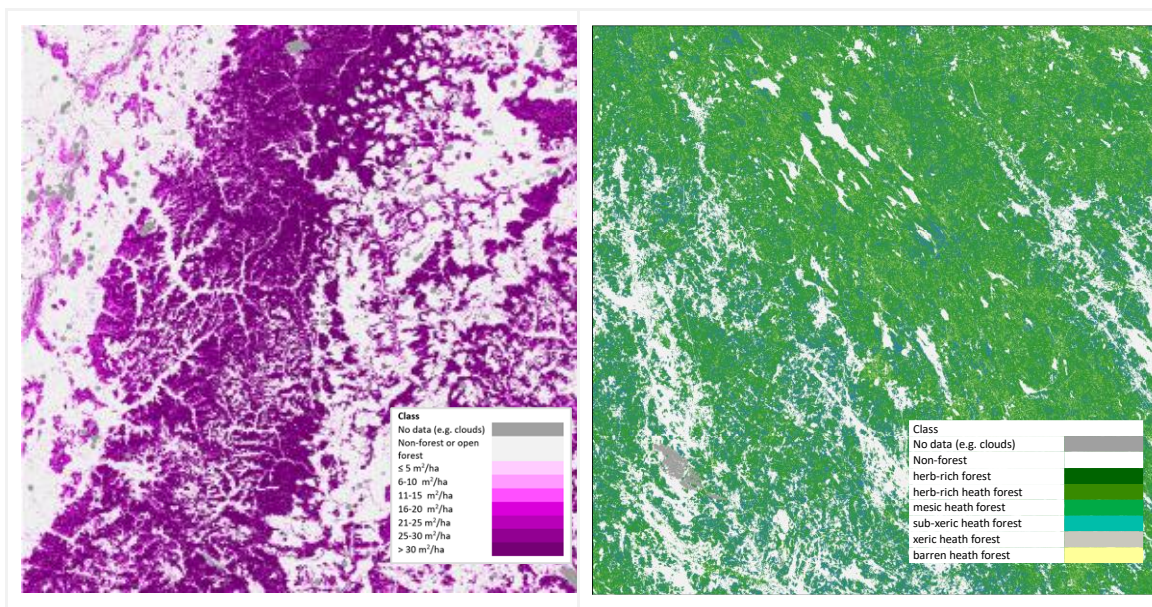
Малюнок 4 Приклади класифікації ґрунтового покриття та деревних порід у Фінляндії (ліворуч) та оцінка обсягу деревостанів за видами (праворуч, червоним кольором позначені лісгосподарські одиниці) (Hämäläinen, et al., 2022)

Праве зображення на малюнку 9 показує оцінки об'єму запасу деревини для сосни (*Pinus sylvestris*), ялини (*Picea abies*) та широколистяних дерев, відповідно. Для порівняння, лісгосподарські одиниці позначені червоним кольором, що добре узгоджується з виявленою мінливістю об'єму запасу деревини для кожної деревної породи.



Малюнок 5 Приклад карти лісового покриття (зелений колір) та нелісових територій (білий колір) у Німеччині (Häme, et al., 2022)

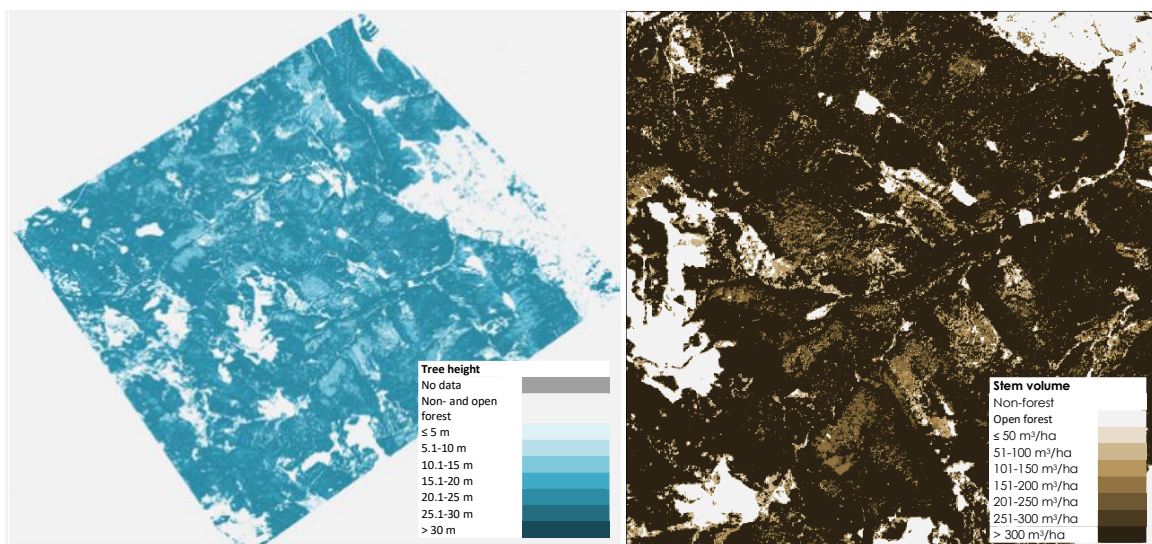
На малюнку 10 показано зразковий фрагмент карти лісового покриття для території приблизно 13 км x 9 км у Німеччині. Однак точність, отримана для оцінок неперервних змінних на рівні ділянки, коливається між середньоквадратичними відхиленнями від 30 до 60%, що відповідає точності, отриманій в інших проєктах (наприклад, Astola et al. 2019). Однак точність варіює між структурними змінними, будучи найвищою для діаметра, висоти та площі поперечного перерізу стовбура (Мал. 11). Оскільки відхилення, як правило, досить низьке, можна припустити, що в середньому оцінки були дуже близькими до реальності. Результати також різняться на різних ділянках.



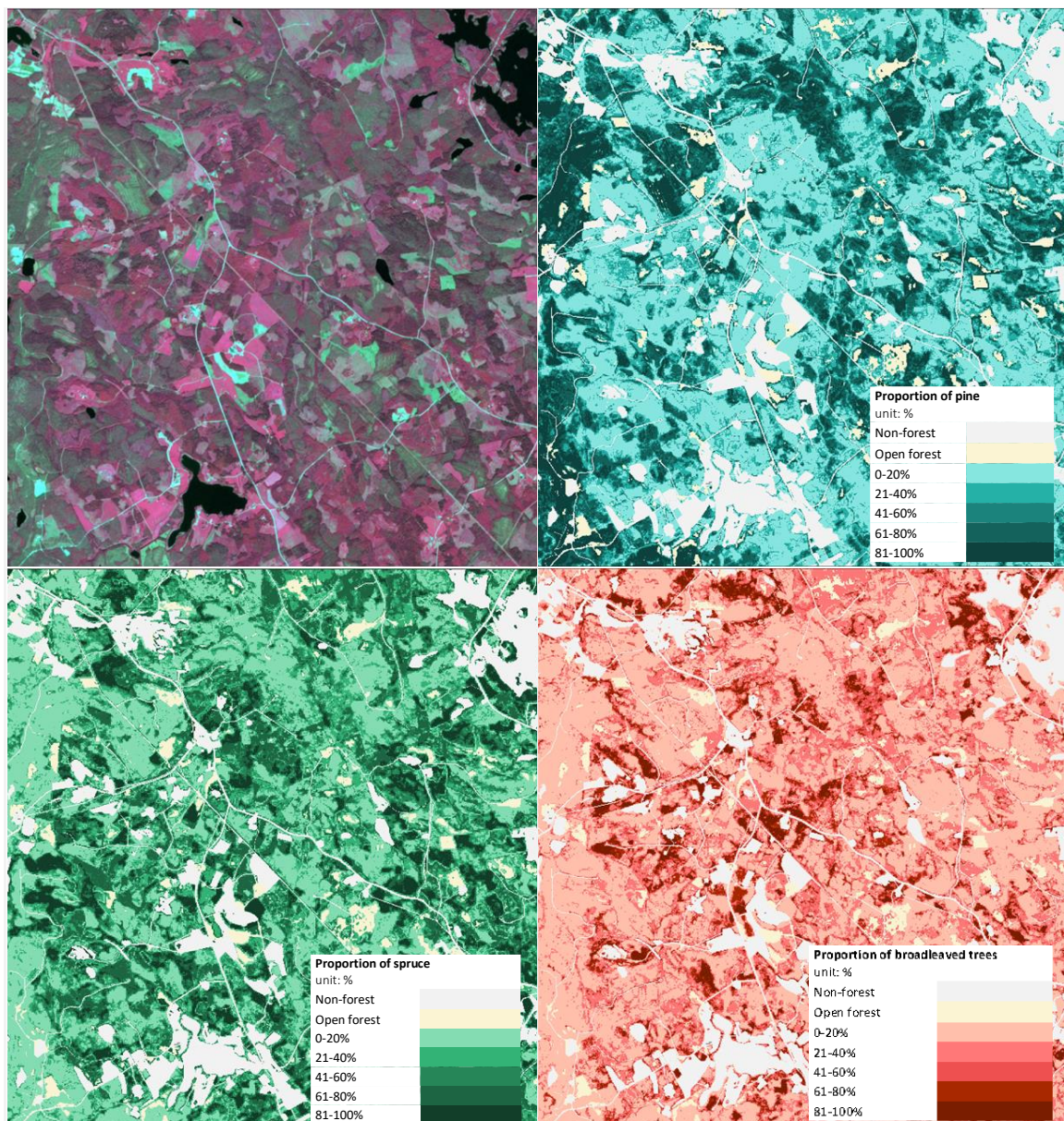
Малюнок 6 Середня розрахункова площа основи/га (Німеччина, ліворуч) та класифікація типів лісу (Фінляндія, праворуч) (Häme, et al., 2022)

Для об'єму стовбура (Малюнок 7 Висота дерев (ліворуч) та об'єм стовбура (праворуч) в Румунії (Häme, et al., 2022)

), середньоквадратичне відхилення, як правило, перевищує 50%.



Малюнок 7 Висота дерев (ліворуч) та об'єм стовбура (праворуч) в Румунії (Häme, et al., 2022)



Малюнок 8 Композит з штучного кольору та пропорції деревних порід у Фінляндії (Häme, et al., 2022)

Для деревних порід результати значно різняться залежно від виду та території, що нас цікавить. Наприклад, у Фінляндії (Зображення 13) точність карти була оцінена як відносне середньоквадратичне відхилення 54% для сосни (відхилення -0,3%, вгорі праворуч), відносне середньоквадратичне відхилення 63% для ялини (відхилення -0,6%, внизу ліворуч) і відносне середньоквадратичне відхилення 88% (відхилення 1,1%, внизу праворуч) для широколистяних порід, відповідно.

Частина II: Збір, опис та аналіз референтних даних

У наступних розділах описано необхідні вхідні дані та методика визначення необхідної кількості та відповідних вихідних даних лісовпорядкування (FMP) і національної інвентаризації лісів (НІЛ).

Оцінка змінних структури лісів за допомогою методів дистанційного зондування ґрунтується на достатніх і якісних вихідних даних. Отримання таких даних часто обмежене наявними ресурсами. Тому нашою метою є використання якомога більшої кількості довідкових даних. Забезпечуючи якість використовуваних даних, ми також застосовуємо методи визначення мінімально необхідних даних для досягнення бажаної точності.

Для досягнення заданої точності класифікації зображень дистанційного зондування ми готуємо вихідні дані, спочатку відбираючи відповідні дані, оцінюючи додаткові польові роботи, які можуть знадобитися, та необхідні кроки попередньої обробки. Щоб визначити, чи є дані релевантними, ми розглядаємо придатність наявних наборів даних і оцінюємо додаткові польові роботи, які можуть знадобитися. Потім ми оцінюємо додану ефективність від включення більшої кількості даних і ресурси, необхідні для досягнення узгодженої мети щодо точності. Таким чином, відбір і збір вихідних даних можна розділити на три етапи:

1. Оцінка прийнятності:

- проаналізувати та визначити, чи можна використовувати будь-які легкодоступні дані як довідкові дані на додаток до польового збору даних НІЛ (наприклад, раніше зібрані дані НІЛ або дані лісовпорядкування)
- проаналізувати будь-які наявні дані на предмет їх актуальності, точності та можливості отримання з них необхідних атрибутів, перелічених у 2.2.3 (обробка не потрібна)

2. Оцінка відповідності:

- визначити кількість вихідних даних, необхідних для досягнення заданої точності
- визначити змінні просторового групування (наприклад, типи лісу) та окреслити їхні просторові межі для попереднього відбору відповідних наборів даних та польових ділянок

3. Підготовка:

- вибрати еталонні набори даних (на основі пунктів 1 і 2) з попередньо відібраних доступних наборів даних
- додати якомога більше ділянок польових досліджень, щоб заповнити будь-які прогалини в доступності даних

3.1. Необхідні дані

3.1.1. Вихідні дані

Дані лісовпорядкування

- **Для оцінки прийнятності:** збираються атрибути
- **Для оцінки релевантності:** Полігони або точки, що вказують на місця, де доступні дані лісовпорядкування, включаючи інформацію про метод і дату збору даних і, можливо, інформацію про точність оціночних даних про рівень деревостану, якщо вона може бути включена без будь-якої обробки даних (будь-яка інша інформація про рівень деревостану, наприклад, видовий або віковий склад, також буде корисною, якщо вона не потребує додаткової обробки)
- **Для підготовки вихідних даних:** Полігони або точки з усіма даними про рівень деревостану, необхідними для підготовки даних відповідно до вимог пункту **Error! Reference source not found.**

Дані НІЛ

- **Для оцінки прийнятності:** збираються атрибути з координатами
- **Для оцінки релевантності:** Координати всіх ділянок збору даних НІЛ (DCP), включаючи вже виміряні ділянки та заплановані ділянки на 2023 рік і пізніше
- **Для підготовки вихідних даних:** Координати з даними на рівні ділянок, зібраними в полі

3.1.2. Допоміжні дані

- **Недоступні території:** Полігони території, недоступних через війну
- **Типи лісів:** Полігони для всієї лісової площі всієї України, що розмежовують цілісні типи лісів

3.2. Оцінка відповідності вимогам

Для того, щоб довідкові дані вважалися прийнятними, вони повинні відповідати наступним критеріям:

- вони повинні дозволяти підготувати всі необхідні атрибути, перелічені в пункті **Error! Reference source not found.**
- вони повинні бути зібрані протягом останніх 5 років
- якщо вони складаються з вибіркової оцінки, то в оптимальному випадку вони повинні мати відносну стандартну похибку нижче 10 % при довірчому рівні 95 %

- вона повинна описувати ділянки або деревостани, однорідні за видовим та віковим складом

3.3. Оцінка відповідності

Групування даних

Щоб зменшити кількість необхідних вибірок, популяція (вся лісова територія), з якої відбирається вибірка, розбивається на підпопуляції (типи лісу). Групування однорідних лісових ділянок, що складаються з подібних типів лісу, зменшує дисперсію відповідних змінних структури лісу, а отже, для отримання значущих оцінок для субпопуляції потрібно менше вибірок. Для остаточного визначення типів лісу, що застосовуються, необхідно взяти до уваги наступні міркування:

- Якщо немає даних про типи лісу для всієї території країни і немає літератури/публікацій, альтернативою може бути використання комбінації екорегіонів (Центральноевропейські мішані ліси, Кримський субсередземноморський лісовий комплекс, Східноєвропейський лісостеп, Паннонські мішані ліси, Хвойні ліси помірного поясу, Карпатські гірські хвойні ліси, Луки, савани і чагарники помірного поясу, Понтійський степ) або кліматичних зон та адміністративних районів.
- Якщо дані про типи лісу в масштабах всієї країни є доступними, і ці дані дуже деталізовані, їх слід згрупувати за подібністю, щоб отримати приблизно 5 типів лісу на екорегіон / кліматичну зону. Подібність визначається на основі характеристик росту.
- Далі необхідно визначити, чи є типи лісу, які є повністю недоступними (наприклад, Кримський субсередземноморський лісовий комплексний екорегіон). У таких випадках необхідно визначити репрезентативні типи лісу.

Необхідний обсяг вибірки для кожної групи

Потім розраховується необхідний обсяг вибірки для кожного типу лісу окремо, використовуючи середні значення та стандартні відхилення однієї з основних ознак (наприклад, деревостану), отримані з наявних даних (наприклад, даних планування ведення лісового господарства).

Необхідний обсяг вибірки визначається за формулою для безперервних даних, розробленою Кокраном (1977):

$$n = \left(\frac{Z\sigma}{e} \right)^2$$

Де:

- n необхідний обсяг вибірки
- Z критичне значення для бажаного довірчого рівня (двостороннє)

- σ оцінене стандартне відхилення (наприклад, визначене на основі попереднього дослідження)
- e прийнятна похибка (в одиницях, що використовуються для стандартного відхилення)

Покриття даних лісовпорядкування

Після визначення необхідного розміру вибірки для кожного типу лісу перевіряється, скільки наборів даних лісовпорядкування є доступними для кожного типу лісу. Оскільки не всі набори даних лісовпорядкування можуть бути застосовані як навчальні дані, дані повинні відповідати наступним вимогам:

- Нові: зібрані протягом останніх 3 років (2020-2022 рр.), максимум 5 років
- Узгоджені: описаний деревостан має бути відносно однорідним за видовим та віковим складом
- Точні: якщо деревостани вимірюються з використанням вибіркового підходу, відносна стандартна похибка оцінок змінних структури лісу повинна бути нижчою за 20 % при 95 % довірчій ймовірності

Рекомендації щодо ділянок НІЛ

Для тих типів лісів, які недостатньо представлені в даних лісовпорядкування, слід вибрати ділянки НІЛ, щоб заповнити будь-які прогалини в вихідних даних. Якщо всі типи лісів вже достатньою мірою охоплені даними лісовпорядкування, то ділянки НІЛ повинні бути розподілені між типами лісів таким чином, щоб розподіл вихідних даних між типами лісів був ближчим до розподілу розрахованих необхідних обсягів вибірки.

3.4. Підготовка вихідних даних

3.4.1. Дані лісовпорядкування

3.4.1.1. Опис даних лісовпорядкування як джерела вихідних даних

Дані лісовпорядкування в Україні представляють детальні характеристики деревостанів, які оновлюються, як правило, кожні 10 років шляхом проведення польових обстежень. Обстеження проводяться в усіх лісах, що знаходяться в управлінні філій Державного спеціалізованого господарського підприємства "Ліси України" або інших користувачів, наприклад, комунальних лісових підприємств, природоохоронних територій тощо. Таким чином, дані лісовпорядкування по лісах України були зібрані в різні періоди.



Малюнок 9 Приклад полігонів лісовпорядкування, позначені кольором за домінуючими породами дерев

Під час проведення досліджень лісовпорядкування польові бригади відвідують деревостани для оцінки їхніх характеристик. Межі лісових полігонів, тобто лісових насаджень, тимчасово безлісних територій (вирубані площі, згарища, мертві ліси, незібрані ліси тощо) та нелісових територій (луки, болота, непродуктивні площі, водойми тощо), оновлюються заздалегідь, використовуючи найсвіжіші знімки дистанційного зондування з високою роздільною здатністю. Ці межі можуть бути скориговані під час польових візитів. Стан ділянки оцінюється для всіх вкритих лісом і тимчасово безлісних ділянок. Існує два індекси, які використовуються для характеристики якості ділянок: стан лісових ділянок і тип лісу. Стан лісової ділянки описує родючість ґрунту (чотири рівні, А - найгірша родючість, D - найродючіші ґрунти) та вологість ґрунту (6 рівнів, від 0 - дуже сухий до 5 - дуже вологий). Тип лісу є більш складною характеристикою, яка, окрім родючості та вологості ґрунту, включає також перелік видів, що представляють корінні лісові насадження на даній території. Класифікація типів лісу в Україні є досить складною. Вона включає понад 100 типів лісу, характерних для Карпат, негірської території, з деякими модифікаціями для Правобережної (Дніпро) та Лівобережної України.

Підготовлені польові команди використовують переважно оптичні методи для оцінки характеристик деревостанів, які можуть поєднуватися з елементарними вимірюваннями дерев (вимірюванням висоти і діаметрів середніх дерев) або відбором проб. Однак, для отримання точних оцінок площі основи в стиглих, перестійних і перестійних деревостанах обов'язковим є використання точкового відбору проб. Для молодих деревостанів візуально оцінюється лише відносність

запасу як частка заповнення деревостану порівняно з нормальним деревостаном на даній ділянці. Ця оцінка є дещо суб'єктивною і значною мірою залежить від досвіду дослідника. Характеристики деревостану включають перелік лісових атрибутів, які описують кожну деревну породу в ярусі деревостану: походження, вік, середній діаметр, середня висота, відносна площа запасу або базальна площа, а також відсоток товарних дерев. Індекс місцезростання надається лише для домінуючих видів. Обсяг деревостану оцінюється за допомогою таблиць врожайності для певного віку, висоти та відносного запасу.

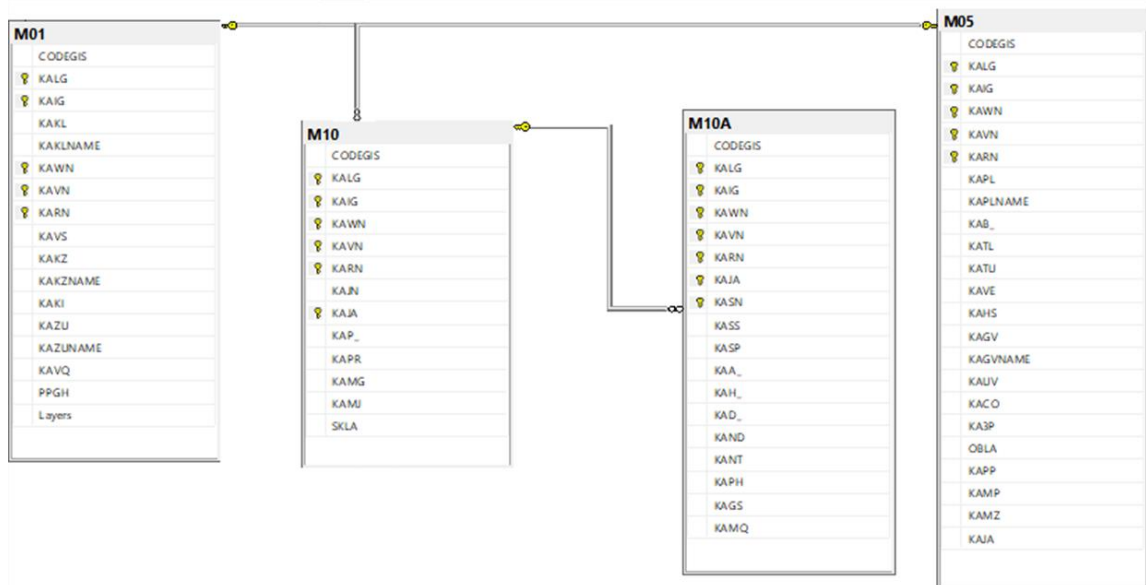
Повний перелік атрибутів рівня деревостану наведено у структурі атрибутів лісовпорядкування у додатку **Error! Reference source not found..**

3.4.1.2. Підготовка даних лісовпорядкування як джерела вихідних даних

Просторові та атрибутивні дані лісовпорядкування зберігаються у двох окремих наборах даних, які можна об'єднати за допомогою унікального ідентифікатора стелу (**Error! Reference source not found.**). Це може бути комбінація наступних полів бази даних лісовпорядкування:

- KALG - лісогосподарська одиниця (філіал ДП "Ліси України")
- KAIG - лісогосподарський підрозділ
- KAWN - лісовий виділ
- KAVN - лісовий полігон (деревостан)

Інформація про атрибути лісовпорядкування структурована в реляційній базі даних, яка пов'язує таблиці для опису різних характеристик лісових полігонів. (Малюнок 10).



Малюнок 10 Зв'язки між таблицями в базі даних лісовпорядкування

Наведену нижче інформацію можна отримати з базиданих і використати як довідкове джерело даних у дослідженні:

- Таблиця M01 – загальна інформація про лісовий полігон: площа деревостану (KAVS), землекористування (KAKZ)
- Таблиця M05 – загальна інформація про деревостан: головна порода (KAPL), індекс ділянки (KAB_), тип лісу (KATL), лісорослинні умови (KATU)
- Таблиця M10 – характеристики ярусів деревостану: номер ярусу (KAJA), коефіцієнт запасу (KAP_), об'єм запасу на гектар (KAMG)
- Таблиця M10A – характеристики деревних порід: порода (KASP), частка поширеності виду (KASS), вік (KAA_), середній діаметр (KAD_), середня висота (KAH_), площа поперечного перерізу (KAGS).

Таким чином, лісові полігони можуть бути об'єднані з відповідними лісовими атрибутами. У дослідженні інформація на рівні деревостанів має бути використана у двосторонній таблиці, в якій рядки представляють унікальні деревостани, а стовпці – лісові атрибути.

У наступній таблиці представлено перелік цільових структурних змінних лісу, з одного боку, та пов'язані з ними атрибути на рівні деревостанів, які можуть бути використані безпосередньо або на їх основі можуть бути отримані цільові змінні для НІЛ на основі Д33:

Таблиця 4 Вихідні дані для змінних структури лісу

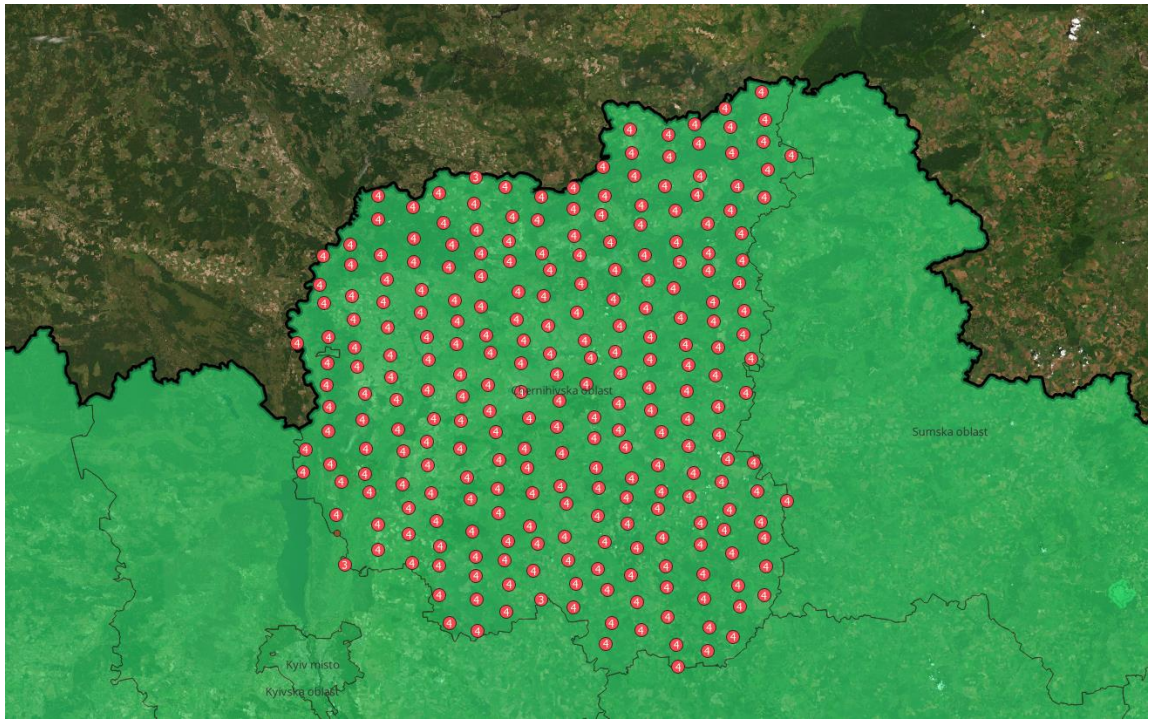
Цільова змінна	Формат/ одиниця	FMP атрибут(и) – Аббревіатура	Атрибути лісовпорядкування (FMP) та пояснення до їх обробки
Рік даних	ціле число	KAVQ	Рік інвентаризаційного обстеження в лісовпорядкуванні
Площа ділянки або деревостану	m ²	KAVS	Площа лісового субполігону
Тип ґрунту	Категорійна змінна	KATU	Умови лісової ділянки
Індекс ділянки	m	KAB_	Індекс ділянки
Ярус	Категорійна змінна	KAJA (обчислено)	Обчислено зі змінною "Ярус"
Тип лісу	Категорійна змінна	KATL	Тип лісу
Розподіл деревних порід:			
Види 1	%	KASP + KASS (обчислено)	Види дерев у поєднанні з видовим різноманіттям (in % of BA)
Види 2	%	KASP + KASS (обчислено)	Види дерев у поєднанні з видовим різноманіттям (in % of BA)
Види n	%	KASP + KASS (обчислено)	Види дерев у поєднанні з видовим різноманіттям (in % of BA)
Середня висота	m	KAH_ (обчислено)	Середня висота деревних порід в ярусі 1
Середній діаметр	cm	KAD + KASP + KANT (обчислено)	Середній діаметр деревних порід у ярусі 1, зважений на N дерев на гектар

Цільова змінна	Формат/ одиниця	FMP атрибут(и) – Абревіатура	Атрибути лісовпорядкування (FMP) та пояснення до їх обробки
Густота	n/ha	KANT + KASP (обчислено)	N дерев для всіх деревних порід у всіх ярусах на га
Площа поперечного перерізу	m ² /ha	KAGS + KASP	BA всіх деревних порід у всіх шарах на га
Середній вік	роки	KAA + KANT + KASP (обчислено)	Середній вік усіх видів дерев у ярусі 1, зважений на N дерев на га
Середній ростучий запас	m ³ /ha	KAMQ + KAGS (обчислено)	Об'єм усіх деревних порід у всіх ярусах на га
Increment	m ³ /ha/a	KAMZ + KAGS (обчислено)	Приріст усіх деревних порід у всіх ярусах на га
Біомаса	t dry/ha	KAMQ + KAGS (обчислено)	Надземна та підземна біомаса, виведена з об'єму та відповідних коефіцієнтів перетворення біомаси
Запас вуглецю	t/ha	KAMQ + KAGS (обчислено)	Похідні від біомаси та відповідних коефіцієнтів перерахунку
Густота крони	%	KAPP	Загальний відносний запас (1+2+3 яруси)

3.4.2. Дані НІЛ

3.4.2.1. Опис даних НІЛ як джерела вихідних даних

Дані НІЛ збираються на таксаційних ділянках однакової конфігурації та просторового розташування по всій території України. Схема вибірки НІЛ була розроблена з використанням регулярної опорної сітки розміром 5 x 5 км. В межах цієї сітки кластери з чотирьох пробних площ розташовані випадковим чином, за винятком буферної зони в 250 м по периметру комірок опорної сітки (Малюнок 11).



Малюнок 11 Кластери з чотирьох пробних ділянок на клітинку сітки для однієї області

У межах цієї сітки кластери з чотирьох пробних ділянок були розташовані випадковим чином, за винятком буферної зони в 250 м по периметру клітинок опорної сітки (Малюнок 14). Пробні ділянки розподілені з інтервалом 420 м по кутах квадратного кластера (**Error! Reference source not found.**). Кластери вимірюються за схемою п'ятирічної ротації.



Малюнок 12 Один кластер, що включає чотири вибіркові ділянки з радіусом обстеження 12,62 м кожна

Пробна ділянка НІЛ складається з чотирьох вкладених круглих ділянок фіксованої площі (Малюнок 12). Основна ділянка радіусом 12,62 м (500 м²) використовується для вимірювання дерев з діаметром на висоті грудей більше 26 см. Підділянки площею 8,92 м (250 м²), 3,98 м (50 м²) і 0,56 м (1 м²) призначені для вимірювання менших дерев з використанням наступних порогових значень діаметрів: 14-26 см, 6-14 см і 2-6 см відповідно (Малюнок 13). Виділені гніздові пробні площі, які проходять по межі деревостанів, поділяються на сегменти.



Малюнок 13 Дизайн ділянки - структура концентричного кола

Дерева наносяться на карту в межах відповідного радіусу ділянки. Діаметри вимірюються для всіх облікових дерев, тоді як висота вимірюється лише для дерев-зразків. Дерева-зразки відбираються для кожного виду за розподілом діаметрів. Для домінуючих видів вимірюють більше чотирьох висот, відбираючи дерева в межах пробних ділянок з різних класів діаметрів. Для решти видів відбирають щонайменше одне (<20% у видовому складі) або два (>20% у видовому складі) середніх зразкових дерева. Крім того, два середні таксаційні дерева, відібрані за межами пробних площ, використовуються для характеристики віку та приросту деревостану за допомогою свердловин.

3.4.2.2. Польові вимірювання автоматично зберігаються в базі даних, яка контролює якість зібраних даних. Підготовка даних НІЛ як джерела вихідних даних

Дані НІЛ, зібрані на пробних площах вибірок, мають бути оброблені для отримання погектарної інформації про ключові характеристики лісу (див. Таблиця 3). Під час розрахунків необхідно враховувати наступні питання Таблиця 3 :

- Інформація розподілена між окремими сегментами вибіркової ділянки, тому це необхідно враховувати при обробці даних, зібраних на відповідній вибраній ділянці.
- Змінні на рівні ділянки (наприклад, землекористування, тип лісу, індекс ділянки тощо) незалежно характеризують кожен сегмент ділянки.
- Погектарні оцінки для змінних на рівні дерев отримують з використанням різних коефіцієнтів дерев, які залежать від радіусу ділянки та площі відповідного сегмента.

Оброблена інформація НІЛ може бути об'єднана з даними спостережень Землі (спектральні профілі Sentinel 2) та допоміжними даними з використанням оцінок на рівні ділянок. Відповідно, ділянки, які межують з різними категоріями землекористування (наприклад, лісисті та безлісі), мають бути виключені з подальшого аналізу на основі ДЗЗ. Потенційно це може спричинити проблеми зі змішаними пікселями, особливо якщо координати центрів ділянок не точно розраховані на місцевості (граничні похибки можуть становити до 10 м). Також необхідно виключити з прогнозу атрибутів лісу всі повністю вкриті лісом ділянки, які представляють лісові насадження різного віку. **Error! Reference source not found.** представлено схему візуальної інтерпретації знімків VHR для визначення того, чи розташовані дані рівнів 2 і 3 в межах однорідної території.



Малюнок 14 Приклад даних рівня 1 (базова карта VHR), накладених на сітку 10 x 10 м, що відображає розмір пікселів зображення HR Sentinel-2, для визначення того, чи розташована вибіркова ділянка (центральна точка) в придатній однорідній області для розмежування еталонних полігонів

Однак, остаточне рішення про включення ділянки до аналізу може бути прийняте безпосередньо в процесі моделювання, використовуючи прогнозні значення відповідного атрибуту.

За допомогою наступного набору ярусів просторових даних можна оцінити та окреслити опорні полігони (Таблиця 5).

Таблиця 5: Шари просторових даних, що використовуються в ГІС для оцінки та розмежування ділянок НІЛ

Просторові дані	Використання
Супутникові знімки з VHF, бажано кольорові та кольорові композити	Основне джерело інформації про лісовий покрив на ділянці НІЛ
Розміщення ілянки НІЛ	Розташування ділянки НІЛ, що використовується для створення буферу (див. нижче)
Буфер 12,62 м навколо розташування ділянок НІЛ	Інформація про площу дослідних ділянок
Сітка з комітками 10м x 10м відповідно до пікселів знімків Sentinel 2	Комітки, що перетинаються з буфером ділянок дослідження, використовуються для зберігання інформації для полігону 10x10м, який може бути використаний як довідкові дані
Полігони кліматичних зон	Додаткова інформація про породний склад лісу на даній території

Частина III: план впровадження

У цій частині III реалізація вищеописаної концепції для НІА на основі ДЗЗ описана у вигляді приблизного плану робіт і часу. Він також містить частку наявних ресурсів у вигляді робочих днів експертів. Бюджет за часом і фінансовими ресурсами був визначений і укладений раніше, восени 2022 року, і лише надав рамки для розгляду частки для різних завдань і етапів обробки, описаних у наступній таблиці.

Таблиця 6: Запропонований план роботи та часовий графік для впровадження НІА на основі ДЗЗ

Завдання	Завдання МКЕ	Запропоновані робочі дні	Завдання НКЕ	Запропоновані робочі дні	Термін виконання
Опис методу	Опис методів, застосованих під час аналізу	10		0	31.12.2023
	Розбудова потенціалу з місцевими експертами, що уможливить майбутній автономний аналіз	10	Тренінг експертів з лісової інвентаризації	15	
Збір даних	Консультація місцевих експертів щодо вимог до супутникових даних, довідкових даних та будь-яких допоміжних даних, необхідних для проведення аналізу	10	Збір первинних даних, необхідних для підготовки референтних даних (всі три рівні: дані лісовпорядкування та НІА + аерофотозйомка)	5	31.03.2023
Підготовка даних	Консультація місцевих експертів у процесі підготовки супутникових даних, референтних даних (включаючи контроль якості) та будь-яких необхідних допоміжних даних	15		0	15.10.2023
		0	Визначити мінімальний розмір вибірки для кожної групи (типу лісу)	0	01.04.2023
		0	Визначити та вибрати оптимальні дані лісовпорядкування у порівнянні з ділянками НІА, обраними для	3	

Завдання	Завдання МКЕ	Запропоновані робочі дні	Завдання НКЕ	Запропоновані робочі дні	Термін виконання
			2023 року та попередніх років		
	Підтримка робочого процесу перевірки референтних даних	5	Налагодження робочого процесу перевірки референтних даних	5	
		0	Підготувати референтні полігони на основі даних лісовпорядкування	32	
		0	Підготувати референтні дані на основі раніше зібраних даних та даних НІЛ, зібраних у 2023 році	18	
	Відбір та попередня обробка вихідних даних (знімки Sentinel 2)	10		0	
Підготовка моделей та виведення структурних змінних лісу	Підтримка виробництва оцінки змінних структури лісу на основі ДЗЗ з використанням Forest-Flux на платформі F-TEP, включаючи розрахунок показників ефективності	13	Виробництво оцінки змінних структури лісу на основі ДЗЗ з використанням Forest-Flux на платформі F-TEP, включаючи розрахунок показників ефективності	13	15.11.2023
Обробка результатів ДЗЗ у карти та таблиці, структуровані для звітності НІЛ	Підтримка агрегування результатів аналізу ДЗЗ у звітні таблиці	10	Агрегування результатів аналізу ДЗЗ у звітні таблиці	16	15.12.2023
Обробка проєкту тестової ділянки (область)	Тестова підготовка даних, збір еталонних даних на основі ділянок НІЛ 2020 та 2021 років, тренування та класифікація і агрегування структурних змінних лісу у вигляді таблиць для однієї області	5	Тестова підготовка даних, збір еталонних даних на основі ділянок НІЛ 2020 та 2021 років, тренування моделі та класифікація і агрегування структурних змінних лісу у вигляді таблиць для однієї області	15	15.07.2023
		88		122	

А 1. Використання дистанційного зондування для інвентаризації та картографування лісів в Україні

А 1.1. Нещодавні досягнення, що покращують можливості моніторингу лісів на основі ДЗЗ в Україні

Картографування лісового покриву з використанням щільних супутникових часових рядів

Ліси в Україні значно пошкоджені внаслідок інтенсивної людської діяльності (лісозаготівлі, розвиток інфраструктури) та природних факторів (лісові пожежі, комахи). Наприклад, нещодавнє всихання соснових лісів, спричинене короїдом, суттєво вплинуло на лісові ландшафти та призвело до більш інтенсивних суцільних рубок у найбільшлісистих північних регіонах. Подальше скорочення лісові накопичення мертвого палива у зв'язку зі зміною клімату значно підвищили горючість ландшафтів, що призвело до катастрофічних лісових пожеж. Проте нелегальний видобуток бурштину залишається дуже специфічним типом порушення на півночі України, де деградовано близько 3 000 га лісових земель (Миرونюк та ін., 2020). Таким чином, національна лісова політика вимагає постійно оновлюваної інформації для збереження біорізноманіття, економічної цінності лісових ресурсів та підтримки міжнародної звітності про ліси на державному рівні.

Вторгнення Росії в Україну обмежило можливості Національної інвентаризації лісів, оскільки великі території України недоступні для збору польових даних. З цієї точки зору, технології дистанційного зондування можуть надати значну підтримку традиційним методам вибіркової інвентаризації лісів. На відміну від багатьох розвинених країн, які використовують технології дистанційного зондування на оперативному рівні, Україна не має достатнього досвіду. Однак, останні дослідження, в тому числі проведені в Україні, вказують на великий потенціал ДЗЗ-Інвентаризації лісів.

Використання технологій дистанційного зондування для моніторингу динаміки лісових екосистем у різних просторових і часових масштабах добре відоме. Ретроспективний аналіз динаміки лісів став важливим компонентом сучасного моніторингу лісів у зв'язку зі збільшенням доступності часових рядів супутникових спостережень (Banskota et al., 2014; Gómez et al., 2016). Досягнення в обробці щільних часових рядів та впровадження відповідних алгоритмів на хмарній платформі Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017) покращили можливості моніторингу лісів у великих просторових масштабах. Спектральні траєкторії супутникових часових рядів виявилися корисними для виявлення довготривалих і не пов'язаних із заміщенням деревостанів порушень (Bullock et al., 2020; Chen, 2021; Coops et al., 2020). Для опису цих траєкторій були запропоновані різні алгоритми часової сегментації (Hermosilla та

ін., 2015a; Huang та ін., 2002; Kennedy та ін., 2010; Zhu & Woodcock, 2014). Крім того, дослідження показали, що існує потенціал для виявлення випадкових збудників порушення лісів за допомогою метрик спектральних змін (наприклад, тривалість, амплітуда), витягнутих з часових траєкторій, і використання їх для більш точного картографування лісів (Ngu-yen et al., 2018a; Schroeder et al., 2017). Вільний доступ до супутникових даних сприяв розвитку методів моніторингу лісового покриву в режимі, близькому до реального часу (Brown et al., 2022; Francini et al., 2020).

Історично глибокий і багатий на дані архів Landsat визнаний важливим ресурсом для моніторингу лісів на великих територіях. Завдяки політиці вільного доступу, широкому просторовому охопленню, помірній роздільній здатності знімків та більш ніж сорокарічному досвіду збору даних, знімки Landsat знайшли широке застосування в різних програмах моніторингу (Wulder et al., 2012, 2019). Протягом останнього десятиліття часові ряди Landsat використовуються як основа для виявлення порушень у лісах (Cohen та ін., 2017; Nguyen та ін., 2018a; Schroeder та ін., 2017), а також як джерела, що забезпечують більш стабільні спектральні траєкторії для класифікації лісів (Hermosilla та ін., 2018; Мацала, Білоус, Миронюк, Голяка та ін., 2021), включаючи картографування за методом імплікації найближчого сусіда (Bell et al., 2015, 2021; Kennedy et al., 2018). Алгоритм LandTrendr (виявлення тенденцій у порушенні та відновленні на основі даних Landsat) (Kennedy et al., 2010) використовується у всьому світі для виявлення щорічних змін (Kennedy et al., 2012; Миронюк та ін., 2020; Nguyen et al., 2018a; Rathnayake et al., 2020) та покращеного багаторічного картографування лісів (Matsala, Bilous, Myroniuk, Holiaka et al., 2021). Аналогічно, підхід Vegetation Change Tracker (VCT) (Huang et al., 2010) та Composite-to-Change (C2C) (Hermosilla et al., 2015a) здебільшого зосереджені на виявленні річних змін та створенні відповідних карт лісового покриву. Враховуючи обмеження для характеристики спектральних змін, спричинених фенологією рослинності, за допомогою річних композитів, алгоритм виявлення та класифікації безперервних змін (CCDC) став надзвичайно корисним для визначення внутрішньорічної фенології рослинності та поступового міжрічного зростання або різкої зміни рослинності (Zhu & Woodcock, 2014). Окрім здатності відображати фенологію рослинності, коефіцієнти гармонічної регресії, отримані з часових рядів спектральних даних, виявилися кращими предикторами ключових лісових атрибутів, ніж змінні композитних зображень. Зокрема, Вілсон та ін. (2018) досягли приблизно дво- або триразового збільшення коефіцієнта детермінації для мод-моделей неперервних змінних (тобто кількості дерев, площі основи, біомаси) з використанням членів гармонійних моделей порівняно з моделями на основі композитних зображень. Подальша оцінка сезонних композитних та гармонійних регресійних підходів виявила кращу дискримінацію між типами лісу з використанням спектральних трендів та інформації про сезонність, кількісно оціненої за допомогою гармонійних вхідних даних (Adams et al., 2020). Крім того, Derwin та ін. (2020) показали, що додавання гармонічних членів до спектральних даних та інших пояснювальних змінних (наприклад, змінних рельєфу) покращує продуктивність прогнозних моделей. Алгоритм CCDC також рекомендується як ефективний засіб для усунення пропущених спостережень, які з'являються через наявність снігу або хмарності (Awfy-Carroll et al., 2019; Wilson et al., 2018). Нещодавні публікації продемонстрували

потенціал для вдосконалення алгоритму CCDC для виявлення навіть незначних змін у наметі (Ye, Rogan, Zhu, Hawbaker, et al., 2021) та моніторингу лісів у режимі, близькому до реального часу (Ye, Rogan, Zhu, & Eastman, 2021; Zhu et al., 2020).

Використання коваріацій, отриманих за допомогою ДЗЗ, для картографування атрибутів лісової інвентаризації

Зростання попиту на просторово визначену інформацію разом із технологічними змінами у зборі даних призвело до широкого застосування LTS для підтримки інвентаризації лісів (Lister et al., 2020). Однак національні програми інвентаризації лісів спочатку не були розроблені для підтримки картографічних результатів, що є ключовою інформаційною потребою для більшості програм моніторингу. Базуючись на фундаментальній роботі Томппо (Tomppo, 1990), багато з цих програм сьогодні використовують методи моделювання найближчого сусіда, щоб пов'язати наземні спостереження з розрідженої мережі пробних ділянок зі спектральними властивостями, отриманими за допомогою дистанційного зондування, з метою створення повномасштабних карт характеристик лісу (Chirici et al., 2016; Eskelson et al., 2009; McRoberts et al., 2010).

У середовищі фахівців з лісової інвентаризації метод найближчого сусіда відноситься до класу методів, які оцінюють характеристики цільового пікселя на основі k еталонних спостережень (тобто польових ділянок), найбільш подібних у багатовимірному просторі допоміжних змінних дистанційного зондування, топографічних, кліматичних та інших змінних навколишнього середовища (Eskelson et al., 2009; McRoberts, 2012; McRoberts et al., 2010). Імпутація найближчого сусіда стала ефективною технологією для просторового прогнозування характеристик лісу на основі подібності між пікселями, пов'язаними з польовими ділянками, і пікселями без такого зв'язку. Цей метод визнано корисним для просторового прогнозування, оскільки він є непараметричним і багатовимірним, а отже, може застосовуватися для одночасного картографування кількох лісових атрибутів (Henderson et al., 2014). Подібність між цільовим пікселем і еталонними спостереженнями можна визначити за допомогою загальних метрик відстані (наприклад, евклідової) або кількісно оцінити за допомогою багатовимірного методу ординації, такого як канонічний кореляційний аналіз (використовується для найбільш подібного сусіда (Moeur & Stage, 1995)) або канонічний аналіз відповідності (використовується для градієнтного найближчого сусіда (GNN) (Ohmann & Gregory, 2002)). Оптимальний вибір кількості сусідів (k) завжди є компромісом між точністю та збереженням коваріації між змінними відгуку. Зокрема, карти характеристик лісів, створені за допомогою моделі імплікації за методом найближчого сусіда $k = 1$, зберігають існуючі комбінації атрибутів, які також можна спостерігати в полі (Ohmann та ін., 2014). McRoberts (2009) продемонстрував, що коваріація між лісовими атрибутами зберігається, коли в моделях імплікації використовується лише один найближчий сусід. І навпаки, імплікація найближчого сусіда з $k > 1$ зазвичай мінімізує середньоквадратичну похибку прогнозу (Hudak та ін., 2008; Wilson та ін., 2012), а вищі значення k можуть бути застосовані, якщо в базі даних є велика кількість референтних спостережень (Eskelson та ін., 2009).

Картографування лісів із застосуванням методу імплікації найближчого сусіда широко використовується в проєктах моніторингу лісів на національному та регіональному рівнях (Beaudoin et al., 2018; Chirici et al., 2020; Wilson et al., 2012). Останнім часом застосування цих методів пов'язане з прогресом в обробці зображень та доступністю безкоштовних супутникових знімків, що створило можливості для інтеграції методів часової сегментації з методами інтерполяції найближчого сусіда. Такі підходи дають важливе уявлення про довгостроковий моніторинг динаміки атрибутів лісу. Зокрема, Оманн та ін. (2012) вперше використали річні коваріанти, отримані за допомогою алгоритму часової сегментації LandTrendr (Kennedy et al., 2010), як вхідні дані для моделі GNN для картографування річних атрибутів лісової рослинності на Тихоокеанському північному заході США. Підхід часової сегментації LandTrendr також використовувався для створення згладжених у часі синтетичних зображень, які були використані для картографування динаміки лісової біомаси в Австралії з використанням методу найближчого сусіда (Nguyen et al., 2018b, 2020). Белл та ін. (2021) застосували алгоритм ансамблевого картування збурень LandTrendr (Cohen et al., 2018) для створення згладжених у часі LTS та оцінки тенденцій у великих живих деревах і корчах за допомогою картування імплікації GNN. Підхід C2C (Hermosilla et al., 2015b) для композиції зображень було застосовано для прогнозування структурних атрибутів лісу та надземної біомаси з використанням імплікації найближчого сусіда в Канаді (Matasci et al., 2018; Zaid et al., 2016).

Значення моніторингу лісів в Україні

Традиційно дослідження, присвячені картографуванню лісового покриву в Україні, здебільшого зосереджувалися на Карпатах (Kuemmerle та ін., 2009, 2011) або на більших європейських територіях, включаючи Україну (Griffiths та ін., 2014; Потапов та ін., 2015; Senf & Seidl, 2021). Автори звітували про зміни в лісах, але не про характеристики лісів, такі як видовий склад та об'єм деревостанів. І навпаки, нечисленні існуючі застосування методів найближчого сусіда для картографування характеристик лісів на локальних тестових ділянках в Україні (Білоус та ін., 2017; Мацала, Білоус, Миронюк, Дячук та ін., 2021) не спиралися на дані, зібрані за допомогою дизайну вибірки національної інвентаризації лісів.

Крім багатьох країн, широке застосування інформації, отриманої з даних дистанційного зондування, у лісовій інвентаризації знаходиться на стадії розвитку в Україні. Попередні результати повторних інвентаризацій лісів на регіональному рівні, які були проведені в Сумській та Івано-Франківській областях (регіонах) протягом 2008-2015 рр. та 2009-2015 рр. відповідно, продемонстрували значний потенціал для підтримки прийняття рішень та оновлення національної лісової статистики (Сторожук та Поллі, 2017). Однак детальний аналіз зібраних даних у поєднанні з супутниковими часовими рядами був представлений в обмеженій кількості досліджень (Миронюк та ін., 2022). Наскільки нам відомо, в Україні більше не застосовувалися програми для моніторингу змін характеристик лісів у просторовому розрізі з використанням даних, отриманих за допомогою національної лісової інвентаризації.

A 1.2. Використання знімків Sentinel 2 для картографування лісового покриву України

Існуючі джерела інформації про просторовий розподіл лісового покриву в Україні та необхідність створення і підтримання актуальної маски лісів на всю територію України

Потреба в актуальній, уніфікованій за змістом, картографічно представлений інформації про поширення лісів по території України є очевидною для багатьох сфер наукової та практичної діяльності. Незважаючи на багаторічний досвід дослідження лісів та значний обсяг отриманої інформації, це питання в Україні ще не вирішене в повній мірі. Остання державна оцінка лісів в Україні була проведена ще у 2010 році. Вона мала переважно статистичний характер і не була підкріплена картографічними матеріалами.

Досвід проведення лісовпорядних робіт в Україні дозволив зібрати величезну кількість інформації про лісовий покрив, у тому числі про його просторовий розподіл. Однак недоліком цієї інформації є її низька "часова роздільна здатність" та часова неузгодженість (базова інвентаризація лісів проводиться один раз на десять років у різний час для різних лісокористувачів), а також те, що вона проводиться за рахунок коштів лісокористувачів і тому не охоплює ліси, які не перебувають в офіційному лісокористуванні. Важливим джерелом інформації для вивчення просторового розподілу лісів України можуть бути матеріали національної інвентаризації лісів, але в Україні ці роботи поки що здійснені лише на прикладі окремих областей (Миронюк та ін., 2022).

Іншим джерелом інформації про просторовий розподіл лісів України можуть бути різноманітні глобальні лісові продукти (зокрема, Global Forest Change (GFC), Landsat Tree Cover Continuous Fields (LTCCF) тощо). Перевагою таких продуктів є те, що вони охоплюють всю територію України, але вони не завжди є достатньо точними та не завжди підтримуються в актуальному стані. Крім того, питання просторового розподілу лісистості в Україні розглядаються у низці наукових праць, які містять як обґрунтування методології таких досліджень, так і результати її практичного застосування (наприклад, Лесів та ін., 2019; Лялько та ін., 2019; Миронюк, Кутя та ін., 2020). Однак з об'єктивних причин такі дослідження охоплюють лише певні часові періоди та/або окремі частини території України.

Таким чином, незважаючи на певну тривіальність цього завдання, в Україні все ще існує потреба у створенні актуальної лісової маски, яка б охоплювала всю територію країни, створювалася за єдиною методологією, постійно та оперативно оновлювалася, інтегрувала інші джерела інформації про просторовий розподіл лісового покриву та була доступною для широкого використання в практичних та наукових цілях (у тому числі шляхом інтеграції до Національної інфраструктури геопросторових даних). Очевидно, що основою для створення такої маски лісів мають бути дані ДЗЗ, а основними її перевагами є досить висока швидкість і відносна дешевизна створення та оновлення (але, водночас, відносно нижча точність порівняно

з матеріалами лісовпорядкування). Така маска лісу також може бути корисною для національної інвентаризації лісів, починаючи з етапу планування інвентаризаційних робіт і закінчуючи просторовим представленням та аналізом інвентаризаційних даних.

Роботи зі створення такої лісової маски були проведені та продовжуються в Державному підприємстві "Лісогосподарський інноваційний науково-дослідний центр" за підтримки Державного агентства лісових ресурсів України (Публічний звіт, 2022 р.).

Методика створення лісової маски України на основі даних Sentinel-2

Перш за все, при створенні лісової маски необхідно чітко визначити поняття "ліс", оскільки існують різні його трактування для різних цілей (Chazdon et al., 2016 та ін.). У нашій роботі ми використовували визначення лісу як земельної ділянки площею не менше 0,1 га, вкритої деревною рослинністю, з вкриттям кроною не менше 30% площі ділянки. До категорії "ліс" були віднесені всі території в межах України, які відповідають цьому визначенню, включаючи ті, які, згідно з українським законодавством, не належать до лісового фонду (наприклад, зелені насадження в межах населених пунктів).

В якості базових даних для створення маски лісів були використані космічні знімки Sentinel-2 рівня 2A. Традиційно в таких роботах широко використовувалися і продовжують успішно використовуватися дані Landsat. Водночас, дані Sentinel-2 мають певні переваги над даними Landsat (що не применшує важливості останніх):

- краща просторова роздільна здатність даних Sentinel-2 (10 м і 20 м) порівняно з даними Landsat 8 (30 м); це дозволяє більш точно ідентифікувати типи земного покриву та їх межі, включаючи лінійні деревостани;
- краща часова роздільна здатність даних Sentinel-2 - 5 днів порівняно з 16 днями у Landsat 8;
- більша кількість спектральних каналів на знімках Sentinel-2 (зокрема, наявність каналів Band 5, Band 6, Band 7, Band 8A, які відсутні на даних Landsat 8).

Однією з головних переваг знімків Landsat порівняно зі знімками Sentinel-2 є значно довший часовий ряд даних, який сягає 50 років. Водночас, з моменту початку місії Sentinel-2 у 2015 році також вже сформовано певний ряд даних (понад 7 років), що дозволяє використовувати різні методи просторово-часового аналізу для даних Sentinel-2.

На наступному етапі роботи були створені безхмарні мозаїки для теплого періоду року (квітень - жовтень) для кожного з регіонів України. Для створення сезонних безхмарних мозаїк були відібрані знімки у відповідних часових діапазонах з хмарністю не більше 30%. До всіх відібраних знімків було застосовано маску хмарності на основі продукту Sentinel-2: Cloud Probability (значення ймовірності хмарності, вище якого дані виключалися з подальшого аналізу, становило 10%). Сезонні мозаїки були сформовані шляхом визначення медіанного значення для кожного каналу серед усіх безхмарних значень кожного пікселя за відповідний період часу.

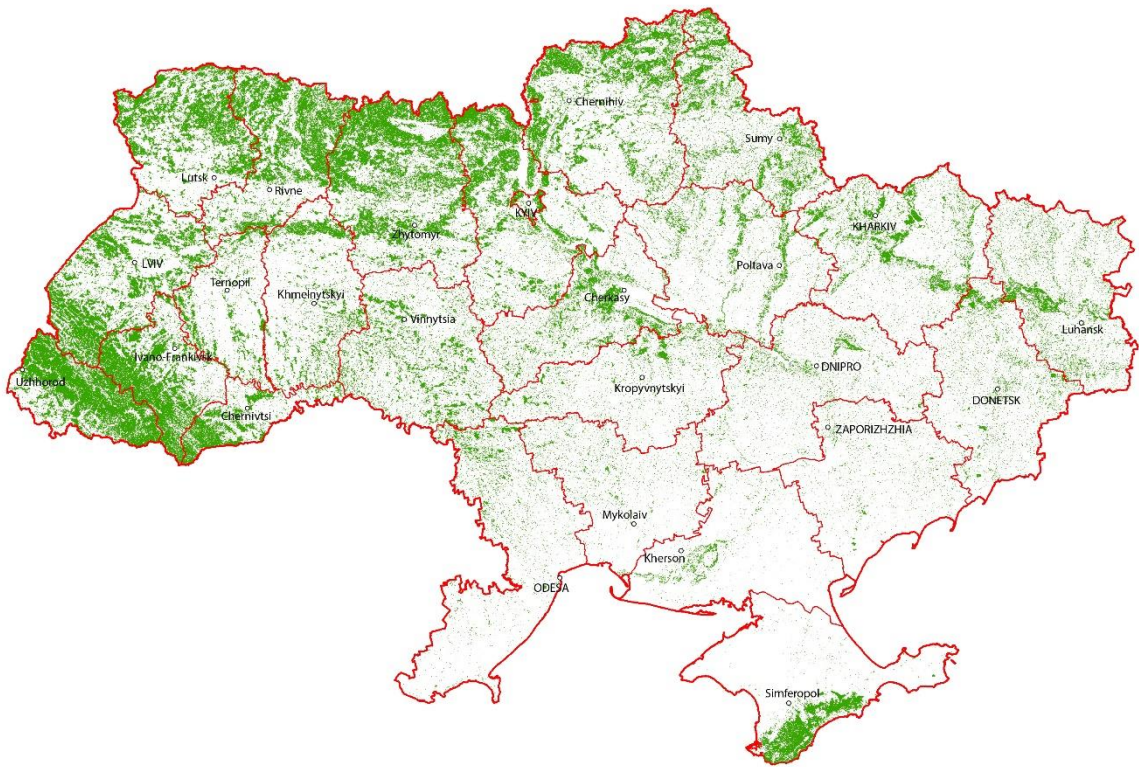
Просторовою основою для створення навчальної вибірки була використана раніше розроблена мережа вибірки для національної інвентаризації лісів (Сторожук, 2019). Це дозволить у майбутньому краще поєднати дані національної інвентаризації лісів з даними дистанційного зондування. Навчальні ділянки були дешифровані переважно за допомогою відкритих знімків високої роздільної здатності, доступних у Google Earth Pro, з використанням програмного забезпечення OpenForis Collect Earth (Bey et al., 2016). Додатковим джерелом для дешифрування навчальних ділянок були знімки SuperView з високою роздільною здатністю, доступні для окремих регіонів України.

Навчальні ділянки були розподілені на два класи - "лісові" та "нелісові". Навчальні ділянки, для яких неможливо було однозначно визначити, який клас земного покриття переважає в їхніх межах, не були включені до навчальної вибірки. Для кожної з областей України було дешифровано від 1123 до 5389 навчальних ділянок (залежно від площі області). Загалом для всієї території України було дешифровано понад 77 тисяч навчальних ділянок. Для деяких областей південної частини України, де було дешифровано замало навчальних лісових ділянок, до навчальної вибірки були додані додаткові лісові ділянки, які не входили до вибіркової мережі національної лісової інвентаризації.

Безмарні мозаїки були класифіковані в середовищі Google Earth Engine. Для всіх безмарних мозаїк як змінні використовувалися значення каналів Band 2, Band 3, Band 4, Band 5, Band 6, Band 7, Band 8, Band 8A, Band 11, Band 12, індексу NDVI та каналів трансформації шапки (яскравість, зелень, вологість). Класифікація проводилася за допомогою класифікатора Random Forest. Маски лісу були згенеровані окремо для кожної області України за 2020 рік. Для кожної з отриманих регіональних масок лісу значення загальної точності навчання та загальної точності перевірки становили не менше 0,99. На завершальному етапі з отриманих масок лісового покриття були видалені об'єкти площею менше 0,1 га.

Результати створення лісової маски України на основі даних Sentinel-2

Наразі створено маску лісів України на 2020 рік (Мал. 1). Роздільна здатність цієї лісової маски становить 10 м і вона містить вкриті лісовою рослинністю ділянки площею не менше 0,1 га.



Малюнок 15 Лісова маска України створена 2020 на основі даних Sentinel-2

На основі цієї лісової маски було розраховано площу лісів для кожної області та для всієї території України. Отримана площа лісів у 2020 році для України в цілому та для більшості її областей є більшою, ніж за даними державної оцінки лісів станом на 1 січня 2011 року. Зокрема, площа лісів в цілому по Україні за даними 2020 року перевищує дані державної оцінки лісів станом на 1 січня 2011 року приблизно на 1,5 млн. га. Однією з причин таких розбіжностей може бути те, що при проведенні державної оцінки лісів не були враховані дані про деяких лісокористувачів, а також дані про лісові площі, які не мали офіційних лісокористувачів або не вважалися лісами (самосіви, зелені насадження в межах населених пунктів тощо). Таким чином, якщо всі деревостани площею 0,1 га і більше зарахувати до лісів, то лісистість України (у % від площі суші) буде приблизно на 2,5% вищою, ніж за офіційними даними.

Отримані дані певною мірою спростовують поширену в Україні думку про значне скорочення площі лісів протягом останніх десятиліть. Дані лісової маски показують, що в найбільш лісистих регіонах України (Полісся та Карпати) не відбулося значного зменшення площі лісів. У цьому випадку точніше було б говорити не стільки про кількісне скорочення площі лісів в Україні, скільки про якісне погіршення стану лісів (як з точки зору ведення лісового господарства, так і з точки зору збереження біорізноманіття), що пов'язано зі створенням монокультур, які є менш стійкими до негативних зовнішніх впливів. Водночас, у східних та південних регіонах України, де умови для росту та відновлення лісів загалом набагато менш сприятливі, спостерігається помітне скорочення площі лісів. Особливо це стосується хвойних деревостанів на піщаних терасах річок.

Серед основних проблем, які виникають при створенні маски лісу на основі даних ДЗЗ, насамперед можна назвати наявність певних помилок класифікації - коли нелісові території помилково відносять до лісових, або навпаки. Загальний відсоток таких ділянок загалом досить невеликий, але їх наявність негативно впливає на точність отриманих даних. Основною причиною таких помилок є наявність типів земного покриву зі спектральними характеристиками, подібними до лісових (зокрема, чагарники, луки, водно-болотні угіддя), що ускладнює їх розмежування. Іншою причиною помилок класифікації є складність рослинного покриву, який не завжди "вписується" в жорсткі та спрощені рамки визначень лісу. У деяких випадках (наприклад, на територіях з розрідженим деревним покривом або на територіях, де відбувається природне лісовідновлення) буває важко чітко визначити, до якої категорії належить конкретна територія - "ліс" чи "неліс" - і провести межу між "лісом" і "нелісом" - навіть під час польових досліджень.

Іншою проблемою є обмеження просторової роздільної здатності використовуваних даних ДЗЗ, що особливо критично при ідентифікації лінійних деревостанів, які широко розповсюджені в Україні. Можливості даних Sentinel-2 в цьому плані кращі, ніж у Landsat, що дозволяє досить точно ідентифікувати лінійні об'єкти шириною понад 20 метрів. Однак завдання ідентифікації вузьких лінійних деревостанів не може бути повністю вирішене навіть за допомогою даних Sentinel-2.

Основні напрямки подальших робіт зі створення маски лісів України:

- створення масок лісів за інші роки, просторово-часовий аналіз та створення просторово-часової маски лісів за весь період, за який доступні дані Sentinel-2, на основі сучасних методів;
- використання нових даних з високою просторовою роздільною здатністю для формування більш точної та детальної навчальної вибірки для класифікації;
- удосконалення методології класифікації для більш точної ідентифікації "лісу" та "нелісу" на проблемних ділянках і, відповідно, зменшення кількості помилок класифікації;
- інтеграція отриманих даних з національною лісовою інвентаризацією; врахування даних національної лісової інвентаризації для покращення маски лісу.

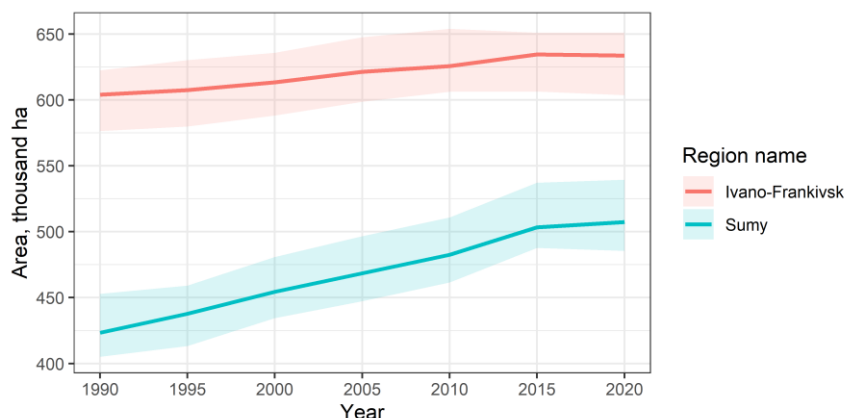
А 1.3. Роль супутникових часових рядів та методу імплікації найближчого сусіда в інвентаризації лісів України на основі ДЗЗ

Завдяки Програмі Фулбрайта, обміну даними між Центром національної інвентаризації лісів України та співпраці між Лісовою службою США (USFS) та українськими науковцями було розроблено та апробовано робочий процес для картографування лісового покриву, деревних порід та об'ємудеревостанів (1990-2020 рр.) у двох областях: Сумської та Івано-Франківської областей. Цей підхід ґрунтується на історичних даних інвентаризації лісів, зібраних під час регіональних інвентаризацій

між 2008 та 2015 роками, часових рядах Landsat та алгоритмах хмарних обчислень на основі GEE (Миронюк та ін., 2022). Алгоритм сегментації CCDC був використаний для отримання безхмарних і згладжених у часі спектральних даних, які були поєднані з еталонними спостереженнями, отриманими для кожного місця розташування вибіркової ділянки.

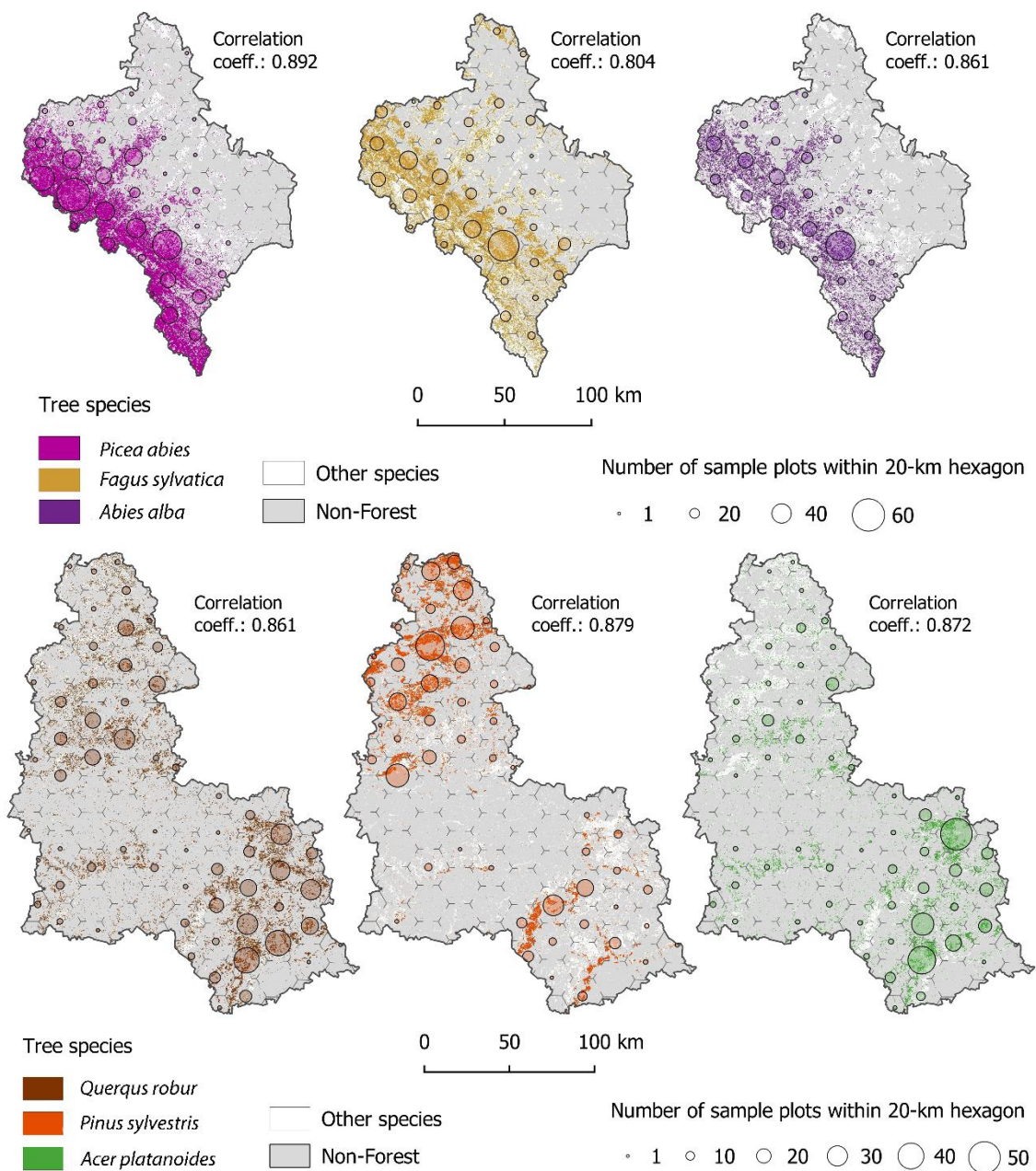
Розроблений робочий процес картографування складався з двох послідовних етапів: (i) картографування лісів/нелісів та (ii) прогнозування основних площ для картографування видів та об'ємів деревостанів. Карти лісів були розроблені з використанням класифікатора випадкових лісів (Breiman, 2001), в той час як базальні площі були спрогнозовані в межах створених лісових масок з використанням методу імплікації Gradient Nearest Neighbor (GNN) (Ohmann & Gregory, 2002). Обидві моделі були незалежно навчені в межах регіонів. Розподіл видів наносився на карту з використанням порогу 1,0 м²га⁻¹ і моделі GNN з k = 1 найближчим сусідом. Цей підхід дозволив досягти кращої точності дискретних карт присутності-відсутності видів або груп видів, які належать до спільних екологічних ніш. Модель GNN з k = 3 була використана для отримання прогнозу об'ємів підросту (базальних площ) виключно для груп видів, оскільки точність прогнозу для окремих видів була низькою. Загалом для побудови карти лісистості/нелісистості в межах Івано-Франківської та Сумської областей було використано 3202 та 9860 спостережень відповідно, тоді як для імплікації за методом найближчого сусіда було використано дані лише з 838 (Івано-Франківська) та 1196 (Сумська) вкритих лісом пробних площ.

Дослідження показало позитивну динаміку зміни лісистості між 1990 та 2020 роками для обох регіонів (Малюнок 14). Точність отриманих карт була високою і стабільною протягом досліджуваних періодів (OA > 0,96±0,02; UA > 0,94±0,03; PA > 0,93±0,04). Крім того, часові ряди виявили кілька "гарячих точок" втрати лісового покриву внаслідок більш інтенсивних рубок, що спостерігалися між 2000-2010 та 2010-2020 роками в Карпатах. Аналіз також задокументував дві хвилі відновлення лісів на покинутих сільськогосподарських землях на півночі України, що відбулися після розпаду Радянського Союзу в 1991 році та земельної реформи в Україні (2000-2010 рр.).



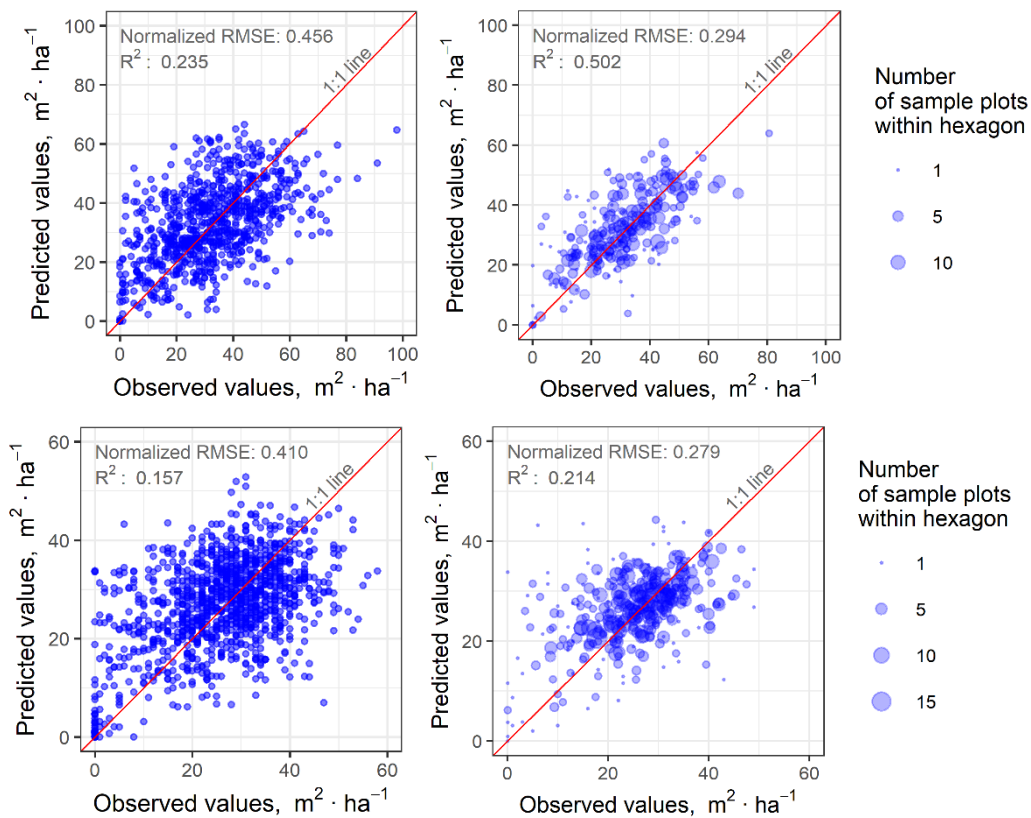
Малюнок 16 Динаміка лісистості (суцільні лінії) на основі класифікації часових рядів Landsat з 95% довірчими інтервалами (стрічки) для двох областей України (Миронюк та ін., 2022).

Точність карт присутності-відсутності, побудованих за допомогою GNN, мала тенденцію до зниження зі збільшенням поширеності видів у досліджуваних регіонах. Модель продемонструвала кращі результати для *Picea abies* в Івано-Франківській області (карра Коена = 0,500) та *Pinus sylvestris* у Сумській області (карра Коена = 0,800), які мали відносно вищі середні значення площі основи і часто зростали в чистих деревостанах. На противагу цьому, прогнози GNN для деяких рідкісних видів були не набагато кращими за випадкові прогнози (наприклад, *Acer pseudoplatanus* в Івано-Франківській області, карра Коена = 0,081). Листяні види, які зазвичай ростуть у мішаних деревостанах (наприклад, *Fraxinus excelsior*, *Acer platanoides* та *Tilia cordata* у Сумській області), мають тенденцію до подібної якості нанесення на карту. Нанесені на карту розподіли найпоширеніших видів (поширеність $\geq 20\%$) для обох досліджуваних регіонів були подібними до просторових моделей, отриманих на основі даних пробних ділянок у ландшафтному масштабі, представлених на Малюнку 15 20-кілометровими шестикутниками.



Малюнок 17 Поширення окремих видів у межах Івано-Франківської (верхня панель) та Сумської (нижня панель) областей на основі GNN-імплікації ($k = 1$): коефіцієнти кореляції відображають зв'язок між нанесеним на карту ареалом виду в межах 20-кілометрового гексагону та його чисельністю

Модель GNN з $k = 3$ найближчими сусідами продемонструвала здатність прогнозувати об'єм запасу. Значення R-квадрат при 30-метровій просторовій роздільній здатності Landsat (розташування ділянок) варіювали для груп видів від 0,33-0,53 (Івано-Франківськ) до 0,12-0,71 (Суми), однак на рівні ландшафту продуктивність розроблених моделей імплікації зростала. Наприклад, значення R-квадрат зросли до 0,50-0,74 (Івано-Франківськ) та 0,21-0,83 (Суми) для агрегованих даних на рівні 5-кілометрового гексагону. Подібна тенденція спостерігалася і для загальної площі поперечного перерізу (об'єму рстучого запасу) (Малюнок 18).



Малюнок 18 Прогнозовані та спостережені значення площі поперечного перерізу в Івано-Франківській (верхня панель) та Сумській (нижня панель) областях на основі моделі імплікації GNN ($k = 3$) (Myroniuk et al., 2022).

A 1.4. Висновки

З методологічної точки зору, представлений Миرونюком та ін. (2022) робочий процес картографування лісів та імплікації найближчого сусіда на хмарній платформі GEE дозволяє користувачам застосовувати цю методологію в інших регіонах України, використовуючи нещодавно зібрані дані інвентаризаційних спостережень за лісами та інші типи супутникових даних (наприклад, Sentinel 2). Підібрані міжрічні та внутрішньорічні тренди часових рядів Landsat, отримані за допомогою алгоритму сегментації CCDC, покращили багаторічну оцінку характеристик лісів. Це сприяє більш надійному моніторингу лісового покриву та послідовній оцінці площі лісів у часі. Прогностичні характеристики методу GNN-імплікації, який використовує всі наявні історичні дані інвентаризації лісів, пов'язані з нормалізованими в часі часовими рядами Landsat, можуть бути значно покращені, коли дані агрегуються на більш високому рівні, ніж рівень ділянки. На додаток до якості даних ДЗЗ, просторова точність польових даних є однією з ключових вимог для отримання точних карт і оцінок атрибутів лісової інвентаризації.

А 2. Атрибути рівня лісовпорядкування

Атрибути, оцінені та агреговані на рівні деревостану, можуть бути використані для визначення еталонних полігонів, як описано в розділі 3.4.1 вище. Як показано в Таблиці 4, можна вивести і розрахувати всі цільові лісові структурні змінні на основі наведеного нижче набору змінних деревостанів для цілей НІЛ на основі Д33. Дані лісовпорядкування в Україні представляють детальні атрибути деревостанів, які оновлюються, як правило, кожні 10 років шляхом проведення польових обстежень. Обстеження проводяться в усіх лісах, що перебувають в управлінні філій Державного спеціалізованого господарського підприємства "Ліси України" або інших користувачів, наприклад, комунальних лісових підприємств, природоохоронних територій тощо. Таким чином, дані лісовпорядкування в лісах України збираються в різні періоди.

Код	Назва українською	Назва англійською	Значення/опис атрибута англійською
M00 - загальна інформація про квартал – General information on forest block			
KALG	Лісогосподарське підприємство	State forest enterprise	Compartment adress
KAIG	Лісництво	Forest district	
KAWN	Квартал	Forest block (Compartment)	
KAKL	Категорія захисності	Conservation status	
KARA	Адміністративний район	Administrative district of Ukraine	
KAGE	Тип рельєфу місцевості	Relief (mountain, flat land)	
MAPL	Площа кварталу	Forest block area (Compartment area)	Area in ha
MAIS	Джерело пожежної небезпеки	Source of fire danger	
MARI	Віддаль до джерела пожежної небезпеки	Distance to the source of fire danger	
MAIR	Радіаційне забруднення кварталу	Radioactive contamination level	
MATN	Табельний номер таксатора	Forest surveyor	

Код	Назва українською	Назва англійською	Значення/опис атрибута англійською
МАЕК	Лісовпорядна експедиція	Forest survey	
РРОВ	Місцевий орган влади	Local authority body	
РРРЗ	Природна зона	Climatic zone	
РРГЛ	Група лісів	Forests Groups (commercial, ...)	
ОБЛА	Адміністративна область	Administrative oblast of Ukraine	
М01 - загальна інформація по виділу – General information on forest polygon			
KALG	Лісогосподарське підприємство	State forest enterprise	Stand address
KAIG	Лісництво	Forest district	
KAKL	Категорія захисності	Conservation status	
KAWN	Квартал	Forest block (compartment)	
KAVN	Виділ	Forest polygon (Forest Stand)	
KARN	Підвиділ	Forest sub-polygon ¹ (Sub-stand)	
KAVS	Площа виділу (підвиділу)	Forest sub-polygon area	All attribute information is provided for sub-polygon (sub-stand), e.g., 1,2, However, more often polygons are not divided, so that there will be only one record
KAKZ	Категорія земель	Land use category	
KAKI	Ознака земель переданих в тимчасове користування	Sign of land transferred for temporary use	Information on who manages forests - permanent (state enterprise) or temporal (game management, recreation) users.
KAZU	Ознака особливо захисних ділянок лісів	A sign of particularly protective areas of forests	This refers to presence of some high conservation values (rare species)
KAVQ	Рік таксації	Year of forest management planning inventory survey	

¹ If forest operations (logging) partially took place within a forest polygon (stand) it can be subdivided into several homogeneous sub-units

Код	Назва українською	Назва англійською	Значення/опис атрибута англійською
PPGH	Господарська частина	Economic part	Forests are divided into four main categories (protective, historical, recreational, commercial). Within these categories more detailed classification can be applied (i.g., forest-park zone of cities green belts)

M05 - лісгосподарські характеристики – General information on forest sub-stand by species

KALG	Лісгосподарське підприємство	State forest enterprise	Sub-stand address
KAIG	Лісництво	Forest district	
KAWN	Квартал	Forest block	
KAVN	Виділ	Forest polygon (stand)	
KARN	Підвиділ	Forest sub-polygon (sub-stand)	
KAPL	Головна порода	Main species	
KAB_	Клас бонітету	Site index	Defined by height in a certain age
KATL	Тип лісу	Forest type	Example B2-OakPine
KATU	Тип лісорослинних умов	Forest site conditions	Example B2
KAVE	Ознака можливих для експлуатації лісів	Sign of possible forest exploitation	Explanation of possible forest exploitation: Related to PPGH. Indicates whether logging is allowed
KAHS	Господарська секція	Economic section	Synthetic category that combines stands that have similar composition, origin, productivity, harvesting age etc. Can be disconnected spatially.
KAGV	Група віку	Age group (young, middle-aged ..)	
KAUV	Код віку рубки	Harvesting age (code)	Age for a final harvest: pine - >80 in commercial forests ... = rotation period
KACO	Селекційна категорія	Breeding category	Reasonable or not for collecting seeds

Код	Назва українською	Назва англійською	Значення/опис атрибута англійською
КАЗР	Цільова порода	Target breed	It related with KAHS. Forest crops can have different species composition from optimal within KAHS. So, it must be regulated during thinning. For example, birch can dominated over pine at age of 10-15 years, however crops were planted to grow pine forest by age of harvesting. Pine is target species
OBLA	Адміністративна область	Administrative oblast of Ukraine	
КАРР	Сумарна повнота 1+2+3 ярусів	Total relative stocking (1+2+3 layers)	Relative stocking as a measure of stand volume in comparison to a yield table (fully stocked stands)
КАМР	Сумарний запас 1+2+3 ярусів	Total volume (1+2+3 layers)	
КАМЗ	Середня зміна запасу	Annual increment	

M10 - розподіл за ярусами (підріст, підлісок) – Forest stand information by layers

KALG	Лісогосподарське підприємство	State forest enterprise	
KAIG	Лісництво	Forest district	
KAWN	Квартал	Forest block (compartment)	
KAVN	Виділ	Forest polygon (stand)	
KARN	Підвиділ	Forest sub-polygon (sub-stand)	
KAJN	Порядковий номер ярусу	Layer number #	
KAJA	Ярус	Layer name	
KAP_	Повнота ярусу	Relative stocking	Relative stocking using BA in comparison to a fully stocked stand defined in a yield table
KAPR	Приживлюваність незімкнутих лісових культур	Forest crops survival	Percentage of seedlings that survive during one vegetation cycle after crop planting
KAMG	Запас на 1 га	Volume in m ³ /ha	

Код	Назва українською	Назва англійською	Значення/опис атрибута англійською
KAMJ	Запас ярусу на виділі	Volume in m ³	
M10A - таксаційна характеристика по породно – Forest stand information by species			
KALG	Лісогосподарське підприємство	State forest enterprise	
KAIG	Лісництво	Forest district	
KAWN	Квартал	Forest block (compartment)	
KAVN	Виділ	Forest polygon (stand)	
KARN	Підвиділ	Forest sub-polygon (sub-stand)	
KAJA	Ярус	Layer	
KASN	Порядковий номер деревної породи	Tree species number	
KASS	Коефіцієнт складу	Species abundance (in % of BA)	
KASP	Деревна порода	Tree species	
KAA_	Вік	Age (mean age)	
KAH_	Висота	Height (mean height (m))	
KAD_	Діаметр	Diameter (mean DBH (cm))	
KAND	Відсоток ділових стовбурів	Percentage of commercial trees	Commercial trees: BA per commercial species is measured using relascope in pre-mature, mature and overmature stands. For young and middle-aged forest, relative stocking can be estimated visually.
KANT	Кількість підросту	Number of seedlings/trees	N of trees per ha
KAPH	Походження	Origin	
KAGS	Сума площі перерізів	Basal Area (BA)	in m ² /ha . The field KAGS in most cases is empty. More reliable data on abundance would be KAMG - volume for stand layer. Then, species volume can be estimated using

Код	Назва українською	Назва англійською	Значення/опис атрибута англійською
			<i>KAMG and KASS. Generally, there is no BA but relative stocking instead.</i>
KAMQ	Запас деревної породи на виділі	Volume within forest polygon	Volume of a tree species in a forest stand or sub-stand

Література

- Astola, H., Häme, T., Sirro, L., Molinier, M., & Kilpi, J. (2019). Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region. *Remote Sensing of Environment*, 223, 257-273. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.019>
- Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N., Wikramanayake, E., . . . Hansen, M. (2017). An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *BioScience*, 67(6), 534-545.
- Häme, T., Kilpi, J., Ahola, H., Rauste, Y., Antropov, O., Rautiainen, M., . . . Bounpone, S. (2013). Improved Mapping of Tropical Forests With Optical and SAR Imagery, Part I: Forest Cover and Accuracy Assessment Using Multi-Resolution Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(1), 74-91. doi:<http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2241019>
- Häme, T., Sirro, L., Dees, M., Mäkelä, A., Penttilä, J., Marin, G., & Tomé, M. (2021). Helping forest owners to manage forest carbon – the Forest Flux project. *GI_Forum*, 9(1), 137-142. doi:https://doi.org/10.1553/giscience2021_01_s137
- Häme, T., Sirro, L., Seitsonen, L., Rauste, Y., Möttöus, M., Miettinen, J., . . . Barreiro, S. (2022). Forest Flux - Final Report. *VTT Technology*, 403, 48. doi:<https://doi.org/10.32040/2242-122X.2022.T403>
- Häme, T., Stenberg, P., Andersson, K., Rauste, Y., Kennedy, P., Folving, S., & Sarkeala, J. (2001). AVHRR-based forest proportion map of the Pan-European area. *Remote Sensing of Environment*, 77(1), 76-91. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00195-X)
- Lindberg, E., & Holmgren, J. (2017). Individual Tree Crown Methods for 3D Data from Remote Sensing. *Current Forestry Reports*, 3(1), pp. 19-31.
- Myroniuk, V., Bell, D. M., Gregory, M. J., Vasylyshyn, R., & Bilous, A. (2022). Uncovering forest dynamics using historical forest inventory data and Landsat time series. *Forest Ecology and Management*, 513(120184). doi:<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120184>
- Richards, J. A. (2013). *Remote Sensing Digital Image Analysis* (5. Ausg.). Heidelberg, Germany: Springer.
- Sirro, L., Häme, T., Rauste, Y., Kilpi, J., Hämäläinen, J., Gunia, K., . . . Paz Pellat, F. (2018). Potential of Different Optical and SAR Data in Forest and Land Cover Classification to Support REDD+ MRV. *Remote Sensing*, 10(6), 26. doi:<https://doi.org/10.3390/rs10060942>

Джерела літератури Додаток 1.

- Adams, B., Iverson, L., Matthews, S., Peters, M., Prasad, A., & Hix, D. M. (2020). Mapping Forest Composition with Landsat Time Series: An Evaluation of Seasonal Composites and Harmonic Regression. *Remote Sensing*, 12(4), 610. <https://doi.org/10.3390/rs12040610>
- Awty-Carroll, K., Bunting, P., Hardy, A., & Bell, G. (2019). An Evaluation and Comparison of Four Dense Time Series Change Detection Methods Using Simulated Data. *Remote Sensing*, 11(23), 2779. <https://doi.org/10.3390/rs11232779>
- Banskota, A., Kayastha, N., Falkowski, M. J., Wulder, M. A., Froese, R. E., & White, J. C. (2014). Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 40(5), 362–384. <https://doi.org/10.1080/07038992.2014.987376>
- Beaudoin, A., Bernier, P. Y., Villemaire, P., Guindon, L., & Guo, X. J. (2018). Tracking forest attributes across Canada between 2001 and 2011 using a *k* nearest neighbors mapping approach applied to MODIS imagery. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(1), 85–93. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0184>
- Bell, D. M., Acker, S. A., Gregory, M. J., Davis, R. J., & Garcia, B. A. (2021). Quantifying regional trends in large live tree and snag availability in support of forest management. *Forest Ecology and Management*, 479, 118554. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118554>
- Bell, D. M., Gregory, M. J., & Ohmann, J. L. (2015). Imputed forest structure uncertainty varies across elevational and longitudinal gradients in the western Cascade Mountains, Oregon, USA. *Forest Ecology and Management*, 358, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.007>
- Bilous, A., Myroniuk, V., Holiaka, D., Bilous, S., See, L., & Schepaschenko, D. (2017). Mapping growing stock volume and forest live biomass: A case study of the Polissya region of Ukraine. *Environmental Research Letters*, 12(10), 13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8352>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/a:1010933404324>
- Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S. B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V. J., Haertel, R., Ilyushchenko, S., Schwehr, K., Weisse, M., Stolle, F., Hanson, C., Guinan, O., Moore, R., & Tait, A. M. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9(1), 251. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>
- Bullock, E. L., Woodcock, C. E., & Olofsson, P. (2020). Monitoring tropical forest degradation using spectral unmixing and Landsat time series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 238, 110968. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.011>
- Chen, S. (2021). Monitoring temperate forest degradation on Google Earth Engine using Landsat time series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 22.
- Chirici, G., Giannetti, F., McRoberts, R. E., Travaglini, D., Pecchi, M., Maselli, F., Chiesi, M., & Corona, P. (2020). Wall-to-wall spatial prediction of growing stock volume based on Italian National Forest Inventory plots and remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84, 101959. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101959>

- Chirici, G., Mura, M., McInerney, D., Py, N., Tomppo, E. O., Waser, L. T., Travaglini, D., & McRoberts, R. E. (2016). A meta-analysis and review of the literature on the k-Nearest Neighbors technique for forestry applications that use remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 176, 282–294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.001>
- Cohen, W. B., Healey, S., Yang, Z., Stehman, S., Brewer, C., Brooks, E., Gorelick, N., Huang, C., Hughes, M., Kennedy, R., Loveland, T., Moisen, G., Schroeder, T., Vogelmann, J., Woodcock, C., Yang, L., & Zhu, Z. (2017). How Similar Are Forest Disturbance Maps Derived from Different Landsat Time Series Algorithms? *Forests*, 8(4), 98. <https://doi.org/10.3390/f8040098>
- Cohen, W. B., Yang, Z., Healey, S. P., Kennedy, R. E., & Gorelick, N. (2018). A LandTrendr multispectral ensemble for forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*, 205, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.015>
- Coops, N. C., Shang, C., Wulder, M. A., White, J. C., & Hermosilla, T. (2020). Change in forest condition: Characterizing non-stand replacing disturbances using time series satellite imagery. *Forest Ecology and Management*, 474, 118370. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118370>
- Derwin, J. M., Thomas, V. A., Wynne, R. H., Coulston, J. W., Liknes, G. C., Bender, S., Blinn, C. E., Brooks, E. B., Ruefenacht, B., Benton, R., Finco, M. V., & Megown, K. (2020). Estimating tree canopy cover using harmonic regression coefficients derived from multitemporal Landsat data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 86, 101985. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101985>
- Eskelson, B. N. I., Temesgen, H., Lemay, V., Barrett, T. M., Crookston, N. L., & Hudak, A. T. (2009). The roles of nearest neighbor methods in imputing missing data in forest inventory and monitoring databases. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24(3), 235–246. <https://doi.org/10.1080/02827580902870490>
- Francini, S., McRoberts, R. E., Giannetti, F., Mencucci, M., Marchetti, M., Scarascia Mugnozza, G., & Chirici, G. (2020). Near-real time forest change detection using PlanetScope imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 53(1), 233–244. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1806734>
- Gómez, C., White, J. C., & Wulder, M. A. (2016). Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116, 55–72. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Griffiths, P., Kuemmerle, T., Baumann, M., Radeloff, V. C., Abrudan, I. V., Lieskovsky, J., Munteanu, C., Ostapowicz, K., & Hostert, P. (2014). Forest disturbances, forest recovery, and changes in forest types across the Carpathian ecoregion from 1985 to 2010 based on Landsat image composites. *Remote Sensing of Environment*, 151, 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.022>
- Henderson, E. B., Ohmann, J. L., Gregory, M. J., Roberts, H. M., & Zald, H. (2014). Species distribution modelling for plant communities: Stacked single species or multivariate modelling approaches? *Applied Vegetation Science*, 17(3), 516–527. <https://doi.org/10.1111/avsc.12085>

- Hermosilla, T., Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., & Hobart, G. W. (2015a). An integrated Landsat time series protocol for change detection and generation of annual gap-free surface reflectance composites. *Remote Sensing of Environment*, 158, 220–234. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.005>
- Hermosilla, T., Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., & Hobart, G. W. (2015b). Regional detection, characterization, and attribution of annual forest change from 1984 to 2012 using Landsat-derived time-series metrics. *Remote Sensing of Environment*, 170, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.004>
- Hermosilla, T., Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., & Hobart, G. W. (2018). Disturbance-Informed Annual Land Cover Classification Maps of Canada's Forested Ecosystems for a 29-Year Landsat Time Series. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 44(1), 67–87. <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1437719>
- Huang, C., Goward, S. N., Masek, J. G., Thomas, N., Zhu, Z., & Vogelmann, J. E. (2010). An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.017>
- Huang, C., Wylie, B., Yang, L., Homer, C., & Zylstra, G. (2002). Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 23(8), 1741–1748. <https://doi.org/10.1080/01431160110106113>
- Hudak, A. T., Crookston, N. L., Evans, J. S., Hall, D. E., & Falkowski, M. J. (2008). Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2232–2245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.009>
- Kennedy, R. E., Ohmann, J., Gregory, M., Roberts, H., Yang, Z., Bell, D. M., Kane, V., Hughes, M. J., Cohen, W. B., Powell, S., Neeti, N., Larrue, T., Hooper, S., Kane, J., Miller, D. L., Perkins, J., Braaten, J., & Seidl, R. (2018). An empirical, integrated forest biomass monitoring system. *Environmental Research Letters*, 13(2), 025004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9d9e>
- Kennedy, R. E., Yang, Z., & Cohen, W. B. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2897–2910. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.008>
- Kennedy, R. E., Yang, Z., Cohen, W. B., Pfaff, E., Braaten, J., & Nelson, P. (2012). Spatial and temporal patterns of forest disturbance and regrowth within the area of the Northwest Forest Plan. *Remote Sensing of Environment*, 122, 117–133. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.024>
- Kuemmerle, T., Chaskovskyy, O., Knorn, J., Radeloff, V. C., Kruhlov, I., Keeton, W. S., & Hostert, P. (2009). Forest cover change and illegal logging in the Ukrainian Carpathians in the transition period from 1988 to 2007. *Remote Sensing of Environment*, 113(6), 1194–1207. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.02.006>
- Kuemmerle, T., Olofsson, P., Chaskovskyy, O., Baumann, M., Ostapowicz, K., Woodcock, C. E., Houghton, R. A., Hostert, P., Keeton, W. S., & Radeloff, V. C. (2011). Post-Soviet farmland abandonment, forest recovery, and carbon sequestration in western Ukraine. *Global Change Biology*, 17(3), 1335–1349. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02333.x>

- Lister, A. J., Andersen, H., Frescino, T., Gatzolis, D., Healey, S., Heath, L. S., Liknes, G. C., McRoberts, R., Moisen, G. G., Nelson, M., Riemann, R., Schleeweis, K., Schroeder, T. A., Westfall, J., & Wilson, B. T. (2020). Use of Remote Sensing Data to Improve the Efficiency of National Forest Inventories: A Case Study from the United States National Forest Inventory. *Forests*, *11*(12), 1364. <https://doi.org/10.3390/f11121364>
- Matasci, G., Hermosilla, T., Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., Hobart, G. W., Bolton, D. K., Tompalski, P., & Bater, C. W. (2018). Three decades of forest structural dynamics over Canada's forested ecosystems using Landsat time-series and lidar plots. *Remote Sensing of Environment*, *216*, 697–714. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.024>
- Matsala, M., Bilous, A., Myroniuk, V., Diachuk, P., Burianchuk, M., & Zadorozhniuk, R. (2021). Natural forest regeneration in Chernobyl Exclusion Zone: Predictive mapping and model diagnostics. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/02827581.2021.1890816>
- Matsala, M., Bilous, A., Myroniuk, V., Holiaka, D., Schepaschenko, D., See, L., & Kraxner, F. (2021). The Return of Nature to the Chernobyl Exclusion Zone: Increases in Forest Cover of 1.5 Times Since the 1986 Disaster. *Forests*, *12*(8), 1024. <https://doi.org/10.3390/f12081024>
- McRoberts, R. E. (2009). Diagnostic tools for nearest neighbors techniques when used with satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, *113*(3), 489–499. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.015>
- McRoberts, R. E. (2012). Estimating forest attribute parameters for small areas using nearest neighbors techniques. *Forest Ecology and Management*, *272*, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.06.039>
- McRoberts, R. E., Tomppo, E. O., & Næsset, E. (2010). Advances and emerging issues in national forest inventories. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *25*(4), 368–381. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.496739>
- Moeur, M., & Stage, A. R. (1995). Most similar neighbor—An improved sampling inference procedure for natural-resource planning. *Forest Science*, *41*(2), 337–359.
- Myroniuk, V., Bell, D. M., Gregory, M. J., Vasylyshyn, R., & Bilous, A. (2022). Uncovering forest dynamics using historical forest inventory data and Landsat time series. *Forest Ecology and Management*, *513*, 120184. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120184>
- Myroniuk, V., Bilous, A., Khan, Y., Terentiev, A., Kravets, P., Kovalevskyi, S., & See, L. (2020). Tracking Rates of Forest Disturbance and Associated Carbon Loss in Areas of Illegal Amber Mining in Ukraine Using Landsat Time Series. *Remote Sensing*, *12*(14), 2235. <https://doi.org/10.3390/rs12142235>
- Nguyen, T. H., Jones, S. D., Soto-Berelov, M., Haywood, A., & Hislop, S. (2018a). A spatial and temporal analysis of forest dynamics using Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*, *217*, 461–475. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.028>
- Nguyen, T. H., Jones, S. D., Soto-Berelov, M., Haywood, A., & Hislop, S. (2020). Monitoring aboveground forest biomass dynamics over three decades using Landsat time-series and single-date inventory

data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84, 101952. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101952>

- Nguyen, T. H., Jones, S., Soto-Berelov, M., Haywood, A., & Hislop, S. (2018b). A Comparison of Imputation Approaches for Estimating Forest Biomass Using Landsat Time-Series and Inventory Data. *Remote Sensing*, 10(11), 1825. <https://doi.org/10.3390/rs10111825>
- Ohmann, J. L., & Gregory, M. J. (2002). Predictive mapping of forest composition and structure with direct gradient analysis and nearest-neighbor imputation in coastal Oregon, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(4), 725–741. <https://doi.org/10.1139/x02-011>
- Ohmann, J. L., Gregory, M. J., & Roberts, H. M. (2014). Scale considerations for integrating forest inventory plot data and satellite image data for regional forest mapping. *Remote Sensing of Environment*, 151, 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.048>
- Ohmann, J. L., Gregory, M. J., Roberts, H. M., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., & Yang, Z. (2012). Mapping change of older forest with nearest-neighbor imputation and Landsat time-series. *Forest Ecology and Management*, 272, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.021>
- Potapov, P. V., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Krylov, A. M., McCarty, J. L., Radeloff, V. C., & Hansen, M. C. (2015). Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive. *Remote Sensing of Environment*, 159, 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.027>
- Rathnayake, Jones, & Soto-Berelov. (2020). Mapping Land Cover Change Over a 25-Year Period (1993–2018) in Sri Lanka Using Landsat Time-Series. *Land*, 9(1), 27. <https://doi.org/10.3390/land9010027>
- Schroeder, T. A., Schleeweis, K. G., Moisen, G. G., Toney, C., Cohen, W. B., Freeman, E. A., Yang, Z., & Huang, C. (2017). Testing a Landsat-based approach for mapping disturbance causality in U.S. forests. *Remote Sensing of Environment*, 195, 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.033>
- Senf, C., & Seidl, R. (2021). Mapping the forest disturbance regimes of Europe. *Nature Sustainability*, 4(1), 63–70. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00609-y>
- Storozhuk, V., & Polley, H. (2017). *Forest Inventory—Status Quo in Ukraine, Experience of Germany, and FAO Recommendations* (Agricultural Policy Report APD/APB/06/2017; p. 52). German-Ukrainian Agricultural Policy Dialogue. https://www.apd-ukraine.de/images/2018/APR/APD_APR_07-2017_Forest_Inventories_ukr.pdf (in Ukrainian)
- Tomppo, E. (1990). Designing a satellite image-aided National Forest Survey in Finland. *Proceedings of the SNS/IUFRO Workshop on the Usability of Remote Sensing for Forest Inventory and Planning, 26–28 Feb. 1990, Umeå, Sweden. International Union of Forest Research Organizations, Vienna*, 43–47.
- Wilson, B. T., Knight, J. F., & McRoberts, R. E. (2018). Harmonic regression of Landsat time series for modeling attributes from national forest inventory data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 137, 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.01.006>

- Wilson, B. T., Lister, A. J., & Riemann, R. I. (2012). A nearest-neighbor imputation approach to mapping tree species over large areas using forest inventory plots and moderate resolution raster data. *Forest Ecology and Management*, 271, 182–198. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.002>
- Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., ... Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>
- Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2012). Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 122, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010>
- Ye, S., Rogan, J., Zhu, Z., & Eastman, J. R. (2021). A near-real-time approach for monitoring forest disturbance using Landsat time series: Stochastic continuous change detection. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112167. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112167>
- Ye, S., Rogan, J., Zhu, Z., Hawbaker, T. J., Hart, S. J., Andrus, R. A., Meddens, A. J. H., Hicke, J. A., Eastman, J. R., & Kulakowski, D. (2021). Detecting subtle change from dense Landsat time series: Case studies of mountain pine beetle and spruce beetle disturbance. *Remote Sensing of Environment*, 263, 112560. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112560>
- Zald, H. S. J., Wulder, M. A., White, J. C., Hilker, T., Hermosilla, T., Hobart, G. W., & Coops, N. C. (2016). Integrating Landsat pixel composites and change metrics with lidar plots to predictively map forest structure and aboveground biomass in Saskatchewan, Canada. *Remote Sensing of Environment*, 176, 188–201. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.015>
- Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152–171. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>
- Zhu, Z., Zhang, J., Yang, Z., Aljaddani, A. H., Cohen, W. B., Qiu, S., & Zhou, C. (2020). Continuous monitoring of land disturbance based on Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 238, 111116. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.009>

