



# Інвентаризація лісів України на основі дистанційного зондування Землі (ДЗЗ-Інвентаризація): аналіз на прикладі Сумської адміністративної області

Віктор Миронюк

Київ, серпень 2023



## **About the Project “Sustainable Forestry Implementation” (SFI)**

The project “Technical Support to Forest Policy Development and National Forest Inventory Implementation” (SFI) is a project established in the framework of the Bilateral Cooperation Program (BCP) of the Federal Ministry of Food and Agriculture of Germany (BMEL) with the Ministry of Environment and Natural Resources of Ukraine (MENR). It is a continuation of activities started in the forest sector within the German-Ukrainian Agriculture Policy Dialogue (APD) forestry component.

The Project is implemented based on an agreement between GFA Group, the general authorized executor of BMEL, and the State Forest Resources Agency of Ukraine (SFRA) since October 2021. On behalf of GFA Group, the executing agencies - Unique land use GmbH and IAK Agrar Consulting GmbH - are in charge of the implementation jointly with SFRA.

The project aims to support sustainable forest management planning in Ukraine and has a working focus on the results in the Forest Policy and National Forest Inventory.

### **Author**

Viktor Myroniuk

### **Disclaimer**

This paper is published with assistance of SFI but under the solely responsibility of the author Viktor Myroniuk under the umbrella of the Sustainable Forestry Implementation (SFI). The whole content, particularly views, presented results, conclusions, suggestions or recommendations mentioned therein belong to the authors and do not necessarily coincide with SFI's positions.

### **Contacts**

Troitska Str. 22-24,  
Irpin, Kyiv region  
+38 (067) 964 77 02

# **ЗМІСТ**

---

<b>ЗМІСТ</b>	<b>1</b>
<b>СПИСОК СКОРОЧЕНЬ</b>	<b>2</b>
<b>КОРОТКИЙ ОГЛЯД</b>	<b>3</b>
<b>1. ВИХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДОЛОГІЯ</b>	<b>4</b>
<b>2. РЕЗУЛЬТАТИ</b>	<b>14</b>
<b>ТАБЛИЦІ</b>	<b>27</b>
<b>РИСУНКИ</b>	<b>28</b>
<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>29</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	<b>30</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА</b>	<b>31</b>

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

---

<b>AGB</b>	Above Ground Biomass - Наземна біомаса
<b>BA</b>	Basal Area – Сума площ поперечних перерізів
<b>CI</b>	Confidence Interval - Довірчий інтервал
<b>FMP</b>	Forest Management and Planning - Лісовпорядкування
<b>FNF</b>	Forest/non-forest – Ліс/ не ліс
<b>GEE</b>	Google Earth Engine
<b>GFF</b>	Green Forest Floor – Живий надґрунтовий покрив
<b>GNN</b>	Gradient Nearest neighbor – Градієнт найближчого сусіда
<b>GREG</b>	Generalized Regression - Генералізована регресія
<b>GSV</b>	Growing Stock Volume – Стовбуровий запас
<b>LC</b>	Land Cover - Земельний покрив
<b>LOO</b>	Leave-One-Out – Перехресна валідація з виключенням по одному
<b>MSI</b>	MultiSpectral Instrument – Мультиспектральний інструмент
<b>NBR</b>	Normalized Burn Ratio - Нормалізований коефіцієнт вигорання
<b>NDVI</b>	Normalized Difference Vegetation Index – Нормалізований різницевий вегетаційний індекс
<b>NFI</b>	National Forest Inventory – Національна інвентаризація лісів
<b>OA</b>	Overall Accuracy - Загальна точність
<b>OWV</b>	Other Woody Vegetation - Інша деревна рослинність
<b>PA</b>	Producer's Accuracy - Точність виробника
<b>RF</b>	Random Forest - Випадковий ліс
<b>RS</b>	Remote Sensing – Дистанційне зондування
<b>SRTM</b>	Shuttle Radar Topography Mission - Радіолокаційна топографічна місія шаттла
<b>TCT</b>	Tasselled Cap Transformation – Трансформація типу «ковпак з пензлем»
<b>TPI</b>	Topography Position Index – Топографічний індекс розміщення
<b>TS</b>	Time Series – Часовий ряд
<b>UA</b>	User's Accuracy - Точність користувача

## КОРОТКИЙ ОГЛЯД

---

Національна інвентаризація лісів (НІЛ) є важливим інструментом оцінки лісових ресурсів для підтримки національної лісової політики. Реалізація НІЛ в Україні дуже обмежена через триваюче російське вторгнення, яке унеможливило збір усіх необхідних польових даних. Таким чином, лише технології дистанційного зондування можуть надати допоміжну інформацію для територій, які не були відвідані під час польових кампаній. Ситуація в Україні відрізняється тим, що значні території не контролюються урядом України, розташовані поблизу лінії фронту або забруднені боєприпасами, що не вибухнули, чи заміновані. У зв'язку з цими проблемами група міжнародних та національних короткострокових експертів розробила Концептуальне дослідження для впровадження НІЛ на території України, використовуючи зібрані дані на вибіркових ділянках НІЛ, інформацію з лісовпорядкування у поєднанні з аерофотознімками та супутниковими знімками (Д33-Інвентаризація).

Концепція Д33-Інвентаризації передбачає використання всіх наявних даних НІЛ, зібраних у 2021-2023 роках за звичайним загальнонаціональним планом вибірки. Для регіонів України, де відсутні дані таких ділянок, характеристики деревостанів отримуються з найновіших (<5 років) наборів даних лісовпорядкування. Вони включають полігональне покриття з межами лісових насаджень та пов'язаними з ними лісовими атрибутами. Поєднання обох наборів даних, тобто даних НІЛ та лісовпорядкування, а також супутникових спостережень є основою для впровадження Д33-Інвентаризації на території України.

Метою цього дослідження є вивчення потенціалу Д33-Інвентаризації в межах Сумської області України як необхідного кроку до впровадження методології в більшому просторовому масштабі. Завдання дослідження полягали в наступному:

- Детальний опис потенційної методології комбінованого використання НІЛ, лісовпорядкування та супутникових даних, включаючи аналіз похибок.
- Перевірка ефективності запропонованого картографічного підходу з використанням різних типів супутникових даних, наприклад, Landsat та Sentinel.
- Оцінка ролі даних лісовпорядкування для покращення можливостей підходу для картографування детальних лісових атрибутів.
- Демонстрація потенціалу Д33-Інвентаризації для оцінки надземної біомаси та вуглецю в лісових насадженнях.
- Розробка кінцевих вихідних таблиць, які можуть бути створені за допомогою Д33-Інвентаризації.

# 1. ВИХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДОЛОГІЯ

## 1.1. РЕФЕРЕНТНІ ДАНІ

У дослідженні було використано три основні джерела вихідних даних: 1) вибіркові ділянки НІЛ, 2) дані лісовпорядкування та 3) візуально інтерпретовані знімки високого просторового розрізнення на ділянках НІЛ. Перші два набори даних використано для розроблення прогностичних моделей та картографування лісових атрибутів. Ці дані були одержані тільки в межах вкритих лісовою рослинністю ділянок і не можуть бути використані для створення бінарних карт ліс/не ліс (FNF). Таким чином, сітка вибірки НІЛ була візуально інтерпретована з використанням усіх розташувань ділянок, щоб підготувати необхідну інформацію для такої класифікації.

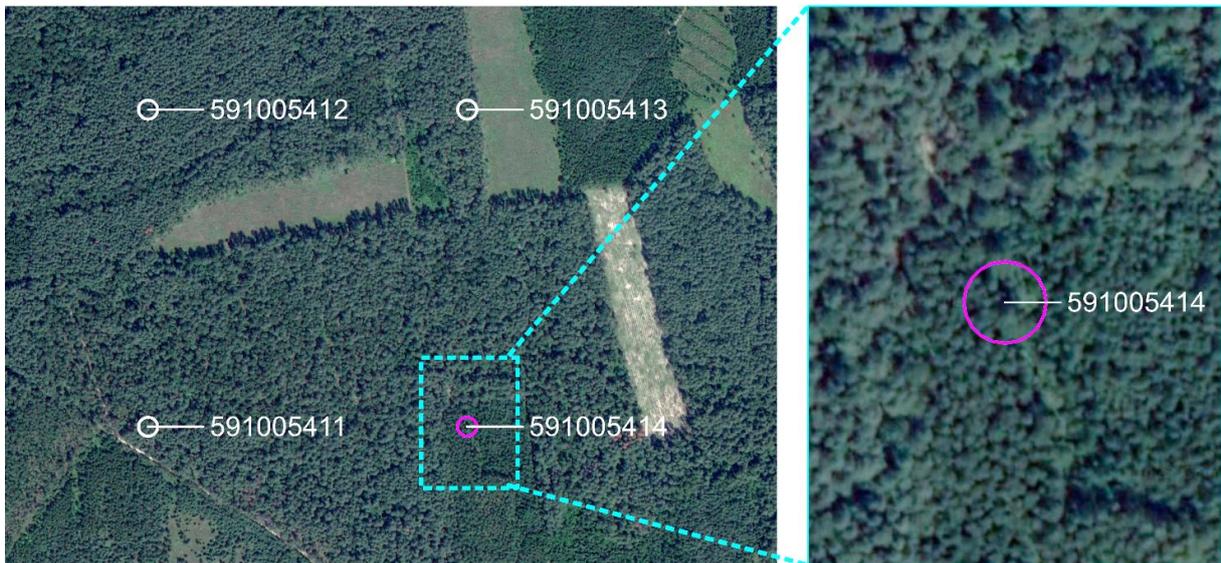
### 1.1.1. Ділянки вибірки НІЛ

Вихідні дані включали перелік таксаційних показників, оцінених на вибіркових ділянках відповідно до структури, запропонованої в Концептуальному дослідженні (Таблиця 3). Центр НІЛ надав цей набір даних у вигляді електронних таблиць у форматі MS Excel. Суми площ поперечних перерізів для кожного деревного виду (ВА) були представлені у відсотках від загальної ВА на пробній ділянці. Згідно з наданими даними, на території Сумської області було ідентифіковано 28 видів деревних порід. Попередні дослідження (наприклад, Myroniuk et al., 2022) продемонстрували вищу ефективність картування видових угруповань, ніж окремих видів, тому для кожної пробної площі були підсумовані ВА за спорідненими групами (Табл. 1).

**Таблиця 1. Групи деревних видів Сумської області**

Видові групи	Наукові назви видів
Дуб	<i>Quercus robur</i> L.
Сосна	<i>Pinus sylvestris</i> L., <i>Picea abies</i> L.
Клен	<i>Acer platanoides</i> L.
Липа	<i>Tilia cordata</i> Mill.
Береза	<i>Betula pendula</i> Roth.
Ясен	<i>Fraxinus excelsior</i> L., <i>Fraxinus viridis</i> F.Michx
Тополя	<i>Populus tremula</i> L., <i>Populus alba</i> L.
Вільха	<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaerth, <i>Alnus incana</i> (L.) Moench
Верба	<i>Salix alba</i> L., <i>Salix fragilis</i> L., <i>Salix caprea</i> L.
Інші твердолисті деревні види	<i>Acer campestre</i> L., <i>Acer negundo</i> L., <i>Acer tataricum</i> L., <i>Juglans nigra</i> L., <i>Quercus borealis</i> Michx., <i>Robinia pseudoacacia</i> L., <i>Ulmus minor</i> Mill.
Інші рідкісні види	Rare species of genus <i>Malus</i> , <i>Pirus</i> , <i>Crateagus</i>

Початковий набір даних містив інформацію про 166 деревостанів, відібраних у 145 унікальних розташуваннях проб НІЛ. Для усунення проблем змішаних пікселів, тобто, коли ділянки межують з різними деревостанами, в дослідженні використовувалися лише ті ділянки, які повністю знаходяться в межах одного деревостану (Рис. 1). Таким чином, у подальшому аналізі було використано лише 145 ділянок НІЛ.



**Рисунок 1. Приклад, що демонструє проблему, коли ділянка (ID = 591005414) знаходиться на межі різних лісових насаджень. Колами позначено ділянки вибірки площею 500 м<sup>2</sup> (радіус ділянки = 12,62 м): білим кольором - ділянки, розташовані в межах одного лісового насадження, фіолетовим кольором - ділянки, розташовані в межах двох різних лісових насаджень.**

### **1.1.2. Вихідні дані лісовпорядкування**

Дані лісовпорядкування представляли вибірку лісових насаджень, які знаходяться в межах 50-метрової буферної зони навколо ділянок НІЛ (Рис. 2). Дані лісовпорядкування включали: а) шар ГІС (шейп-файл ESRI) з межами лісових насаджень та б) таблицю (електронна таблиця MS Excel) з вибраними атрибутами лісу, які можуть бути використані для отримання тієї ж структури даних, що і для ділянок НІЛ.



**Рисунок 2. Сукупність даних лісовпорядкування, що перетинають вибіркві ділянки НІЛ в межах 50-метрового буфера.**

Ці два набори даних можна пов'язати за допомогою унікального ідентифікатора ділянки (ключового поля) у наступному форматі - OOOEEDDBBBPPPS. Ключове поле може бути сформоване за допомогою наступних стандартних атрибутів:

- OO – код Сумської області (двозначний, 59)
- EEE – код лісогосподарського підприємства (тризначний, наприклад, 060)
- DD – код лісового виділу (двозначний, напр., 01)
- BBV – таксаційний квартал (тризначний, напр., 039)
- PPP – таксаційний виділ (тризначний, напр., 020)
- S – таксаційний підвиділ (однозначний, напр., 0).

На відміну від ділянок НІЛ, які містять оцінки сум площ поперечних перерізів кожного деревного виду, дані лісовпорядкування не містять такої інформації. Таким чином, суми площ поперечних перерізів розраховано з використанням таблиць сум площ перерізів і запасів насаджень при повноті 1,0 («стандартні таблиці») (Білоус та ін., 2020):

$$BA_{sp} = BA_{1.0} \cdot \frac{GSV_{sp}}{GSV_{1.0}},$$

де  $BA_{sp}$  – ВА відповідного деревного виду,  $\text{м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$ ;  $BA_{1.0}$  – ВА нормального деревостану (тобто деревостану з відносною повнотою 1.0) за «стандартними таблицями»,  $\text{м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$ ;  $GSV_{sp}$  – стовбуровий запас деревного виду за даними лісовпорядкування,  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ ;  $GSV_{1.0}$  – відповідний стовбуровий запас нормального деревостану за «стандартними таблицями»,  $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$ .

Таблиці сум площ перерізів і запасів при повноті 1,0 використовують висоту деревостану як вхідну змінну для отримання оцінок  $BA_{1.0}$  та  $GSV_{1.0}$ . Варто зазначити, що зазначені таблиці в Україні були складені лише для основних лісоутворювальних порід. Для інших порід суму площ поперечних перерізів ВА розраховували, використовуючи «стандартні таблиці» для відповідних видів-замінників (Табл. 2).

Густоту деревостанів ( $N_{sp}$ ) розраховували за середнім діаметром для конкретного деревного виду та оцінкою  $BA_{sp}$ :

$$N_{sp} = 40000 \cdot \frac{BA_{sp}}{\pi \cdot D_{sp}^2},$$

де  $D_{sp}$  – середній діаметр деревостану для деревного виду згідно з даними лісовпорядкування, см;  $\pi$  – 3.1416.

**Таблиця 2. Породи-замінники, що використовуються для оцінки сум площ перерізів за допомогою «стандартних таблиць»**

<b>Наукова назва деревного виду</b>	<b>Код деревного виду</b>	<b>Код виду-замінника</b>
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	202805	202805
<i>Betula pendula</i> Roth.	302620	302620
<i>Ulmus minor</i> Mill.	202520	202200
<i>Salix alba</i> L.	304403	304400
<i>Salix fragilis</i> L.	304410	304400
<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaerth.	304110	304110
<i>Ulmus laevis</i> Pall.	202505	202200
<i>Quercus robur</i> L.	202080	202080 <sup>1</sup>
<i>Quercus rubra</i> L.	202050	202080 <sup>2</sup>
<i>Acer platanoides</i> L.	202430	202200
<i>Acer campestre</i> L.	202433	202200
<i>Acer negundo</i> L.	202450	202200
<i>Tilia cordata</i> Mill.	304235	202080 <sup>3</sup>
<i>Populus tremula</i> L.	304000	304000
<i>Pinus sylvestris</i> L.	100150	100150
<i>Populus alba</i> L.	304305	304300
<i>Populus Canadensis</i> Moench	304318	304300
<i>Populus nigra</i> L.	304345	304300
<i>Malus sylvestris</i> L.	513410	202200
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	100215	100215
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	202325	202325
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> L.	202310	202325
<i>Carpinus betulus</i> L.	202200	202200

### 1.1.3. Візуальна інтерпретація даних НІЛ

Для візуальної фотоінтерпретації пробних ділянок НІЛ використовувався плагін Collect Earth (Bey et al., 2016) для Google Earth Pro (Табл. 3, Рис. 3). Лісом при інтерпретації вважали насадження площею > 0,1 га із зімкнутістю крон > 30%.

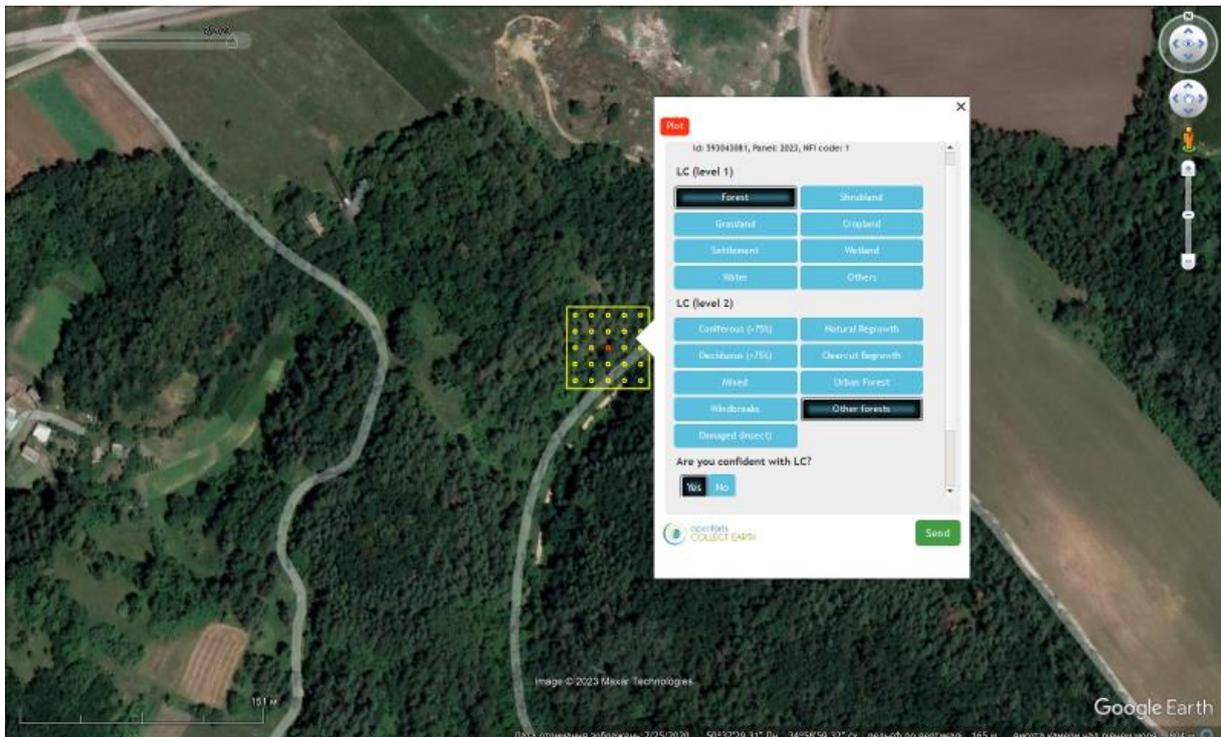
**Таблиця 3. Розподіл ділянок вибірки за категоріями земельного покриття (LC)**

<b>Земний покрив</b>	<b>Частота</b>
Ліс	147
Інша деревні насадження (ІДН)	55
Пасовища/ Луки	98
Орні землі	409
Водно-болотні угіддя	33
Вода	13
Урбанізовані території	21
Разом	776

<sup>1</sup> Штучні насадження насінневого походження.

<sup>2</sup> Природні насадження вегетативного походження.

<sup>3</sup> Природні насадження насінневого походження.



**Рисунок 3. Інтерфейс користувача програми Collect Earth, що використовується для фотоінтерпретації.**

Історичні знімки Google Earth Pro дозволили відстежити фенологію рослинності, що покращило інтерпретацію подібних типів рослинності. Це було важливо для відокремлення орних земель і водно-болотних угідь від луків.

## 1.2. Супутникові часові ряди

У цьому дослідженні використовувалися часові ряди (TS) супутників Landsat і Sentinel 2 в межах часового діапазону, для якого були доступні обидва набори даних (тобто, березень 2017 - червень 2023). У дослідженні були використані всі доступні зображення відбиття поверхні, надані у вигляді колекцій Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017) з Landsat 7-9, Collection 1, Tier 1 та гармонізованого Sentinel 2 MSI, Level 2A. Хмари, тіні від хмар та сніг на знімках Landsat були відсіянні за допомогою атрибутів якості пікселів, згенерованих за допомогою алгоритму CFMask (Foga et al., 2017) На додаток до оригінальних спектральних діапазонів, до колекцій зображень були додані перші три основні компоненти (яскравість, зелень і вологість) перетворення Tasseled-Cap (TCT) (Crist & Cicone, 1984), нормалізований коефіцієнт вигорання (NBR) (Key & Benson, 2006), і нормалізований індекс різниці рослинності (NDVI).

Колекція знімків Landsat була підготовлена з просторовим розрізненням 30 м. Колекція знімків Sentinel була трансформована до просторового розрізнення 20 м та 10 м.

### 1.3. Змінні навколишнього середовища

У дослідженні були використані допоміжні змінні навколишнього середовища задля покращення ефективності прогнозних моделей (Рис. 4). Ці змінні включали індекс висоти та положення рельєфу (TPI) (Weiss, 2001) отриманий за даними 90-метрової радіолокаційної топографічної місії Шаттла (SRTM), середньорічну кількість опадів та максимальну температуру в липні (Abatzoglou et al., 2018).

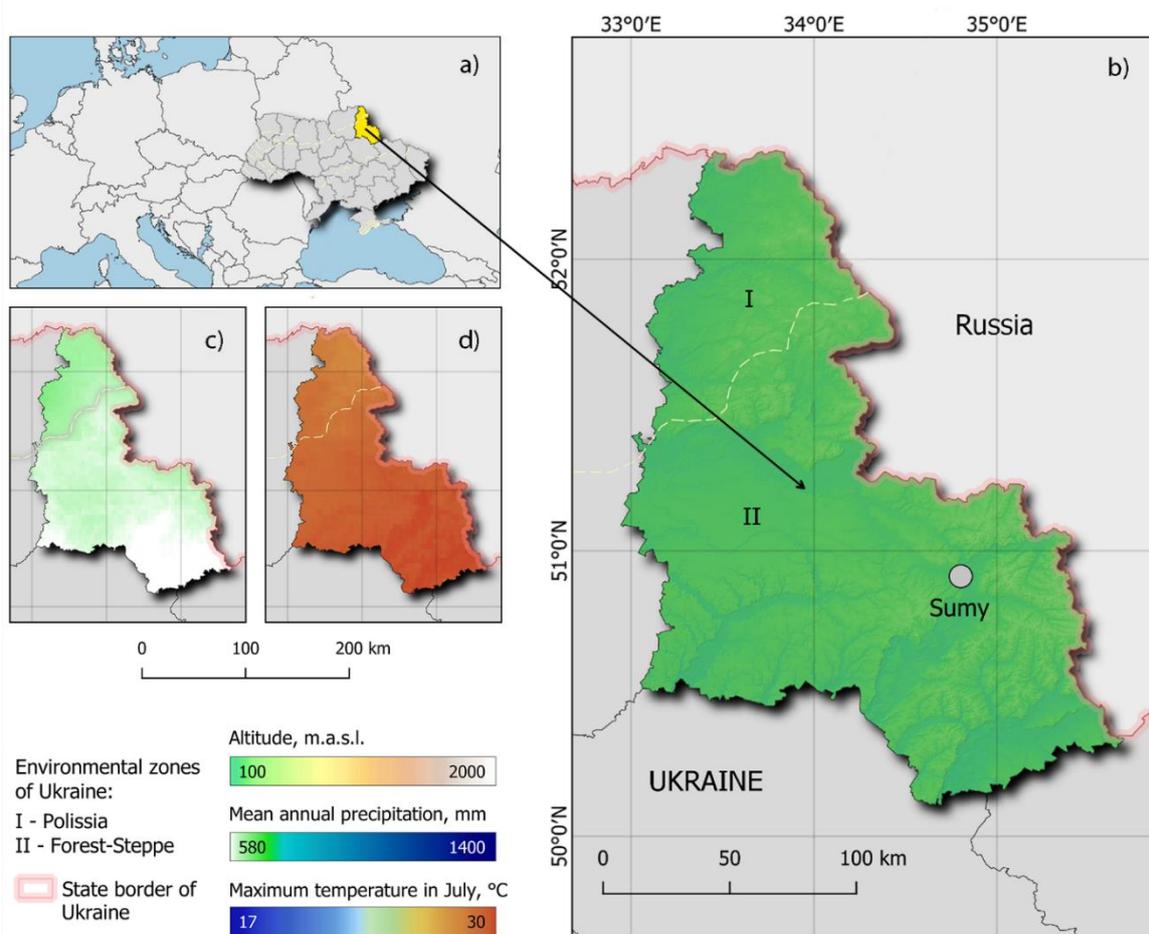


Рисунок 4. Розташування Сумської адміністративної області (а) разом з екологічними градієнтами: (b) висота над рівнем моря, (c) середньорічна кількість опадів, (d) максимальна температура в липні, °C.

### 1.4. Моделі біомаси та вуглецю

Надземна біомаса (AGB) та запас вуглецю були оцінені для кожного деревостану за допомогою алометричних рівнянь (Bilous et al., 2017) (Додаток 1). Ці рівняння використовують таксаційні показники деревостанів (деревний вид, вік, клас бонітету, відносна повнота) для розрахунку живої біомаси лісу. Вміст вуглецю в стовбурах і гілках приймався 50% біомаси, а в листі крони, підліску і підрості - 49% (GFF) (Matsala et al., 2023).

### 1.5. Робочий процес обробки

Для обробки даних використовувалися хмарні обчислення GEE, що прискорило багато етапів обробки зображень. Крім того, для підготовки даних було використано програмне забезпечення Quantum GIS та R.

### 1.5.1. Сегментація супутникових часових рядів

На відміну багатьох застосувань, які використовують сезонні мозаїки зображень (наприклад, щомісячні або річні), у цьому дослідженні використано згладжені в часі супутникові знімки. Часова сегментація була виконана за допомогою алгоритму (CCDC) безперервного виявлення та класифікації змін (Zhu & Woodcock, 2014). Цей підхід базується на гармонійній регресії, що фіксує циклічні зміни спектрального відбиття відповідно до фенології рослинності протягом року. Алгоритм CCDC використовує всі доступні спостереження на рівні пікселів і розбиває часові ряди на послідовні сегменти, які відповідають стабільним спектральним траєкторіям без зміни земного покриву. Коефіцієнти гармонійної моделі можуть створити синтетичне зображення для будь-якої дати, для якої доступні часові ряди або використовуватися як предикторні змінні в класифікації.

Колекції зображень були сегментовані за всіма доступними спектральними діапазонами, трьома першими складовими перетворення TCT, NBR та NDVI. Алгоритм CCDC використовував налаштування за замовчуванням щодо порогів вірогідності виявлення змін, мінімальної кількості спостережень для позначення змін тощо (Zhu & Woodcock, 2014).

Зважаючи на великий обсяг інформації, що підлягає обробці, сегментація за методом CCDC була виконана для сітки  $0,5 \times 1^\circ$  за широтою та довготою, що без пропусків вкривають Сумську область (Рис. 5).

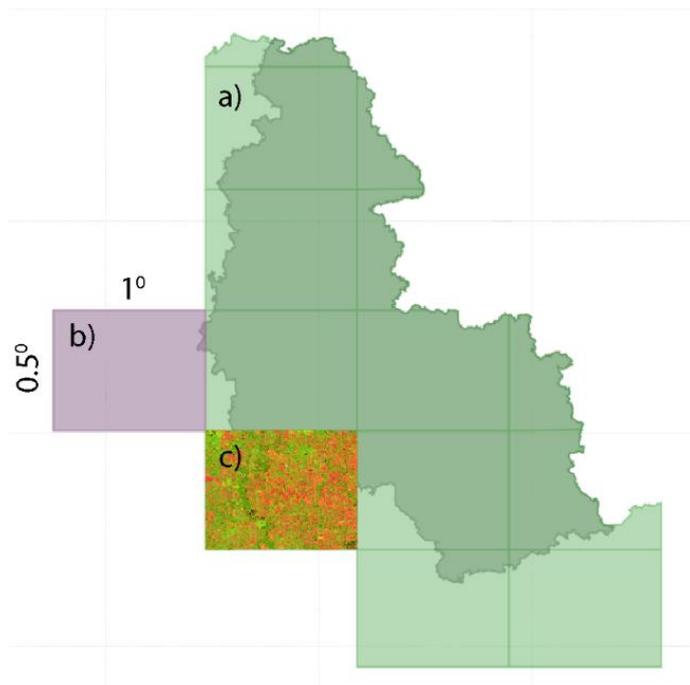


Рисунок 5. Стандартна  $0,5 \times 1$  растрова сітка, що покриває Сумську область: (а) комірки, що перетинають межу Сумської області; (б) обрана комірка для обробки; (с) інтегроване синтетичне зображення в межах комірки, що опрацьовується.

### 1.5.2. Картографування лісового покриву

Вкриті лісом території були нанесені на карту з використанням класифікатора Random Forest (RF) (Breiman, 2001). Як і в попередньому дослідженні (Myroniuk et al., 2022), в

класифікації використовувалися лише спектральні змінні, які включали синтетичні значення спектральних каналів (яскравість, зеленість, вологість перетворення TCT та NBR), прогнозовані для початку (15 квітня), середини (15 червня) та кінця (15 жовтня) періоду вегетації. Ці змінні були доповнені коефіцієнтами гармонічних моделей CDDC та похідними (фаза, амплітуда та щільність спостережень на сегмент). Дати інтерпретації зображень для всіх ділянок НІА перетиналися з відповідними сегментами зображення CCDC. Класифікаційні моделі тренувалися незалежно для Landsat і двох мозаїк Sentinel (з просторовим розрізненням 10 м і 20 м). Потім вони були застосовані до цільового року (2022) для отримання карт земельного покриття (див. Табл. 3). Лісові маски були отримані після перекласифікації карт в бінарний растр.

### 1.5.3. Прогнозування таксаційних показників

Лісові атрибути були нанесені на карту з використанням методу градієнту найближчого сусіда (GNN) (Myroniuk et al., 2022; Ohmann & Gregory, 2002). Цей підхід є алгоритмом багатовимірного прогнозування, яка може характеризувати структуру рослинного угруповання як цілісну одиницю, тобто одночасно прогнозувати комбінації різних показників насадження. Модель GNN була побудована з використанням того ж переліку предикторних змінних, що і у випадку моделі RF. В якості змінних відгуку були використані значення загальної площі поперечного перерізу, а також площі поперечного перерізу груп видів на 1 га (див. Табл. 1). Прогнозні значення для кожної цільового атрибуту були зроблені з використанням трьох найближчих сусідів. Після прогнозування сум площ поперечних перерізів застосовувалося порогове значення  $BA > 1 \text{ м}^2$  для побудови карт присутності/відсутності видів. Карти домінуючих видів (за BA) були розроблені з використанням прогнозованих оцінок на рівні пікселів.

### 1.6. Оцінка точності карти

Точність моделей RF було перевірено за допомогою перехресної перевірки методом виключення по одному (leave-one-out (LOO)). Згідно з цією процедурою, відбулося тренування моделі RF на основі всіх даних (776 ітерацій), окрім одного спостереження, яке було використано в оцінці точності. Отримані списки спостережених і прогнозованих значень були використані для побудови матриць похибок з використанням протоколу "хороших практик" (Olofsson et al., 2014). Моделі RF оцінювали з використанням 95% довірчих інтервалів (CI) для оцінок точності виробника (PA), користувача (UA) та загальної точності (OA).

Точність моделей GNN оцінювали за допомогою модифікованого підходу LOO, заснованого на трьох незалежних найближчих сусідах (Ohmann & Gregory, 2002) за винятком ділянок, розташованих поруч в одному кластері.  $R^2$  було використано для звіту про прогностичну ефективність моделей для неперервних значень площі поперечного перерізу, тоді як бінарний прогноз присутності/відсутності виду оцінювався за допомогою каппа-коефіцієнта Коена.

## 1.7. Процедура оцінювання

### 1.7.1. Розрахунок площі

Вкрита лісом площа, отримана безпосередньо з карти, може відрізнитися від фактичної площі через поєднання класів, нанесених на карту. Після побудови матриці помилок можна використовувати оцінку площі, скориговану на похибку. Поряд з оцінкою площі, довірчі інтервали для лісистості також можуть бути надані для кількісної оцінки невизначеностей оцінок. Це дослідження повністю побудоване на процедурі "хороших практики" для кількісної оцінки вкритої лісом площі та пов'язаних з нею невизначеностей (Olofsson et al., 2014).

## 1.8. Оцінка таксаційних показників за допомогою моделей

### 1.8.1. Розрахунок площі

Вкрита лісом площа, отримана безпосередньо з карти, може відрізнитися від фактичної площі через плутанину між класами, нанесених на карту. Після побудови матриці поєднання можна використовувати оцінку площі, скориговану на похибку моделі. Поряд з оцінкою площі, довірчі інтервали для лісистості також можуть бути надані для кількісної оцінки похибок. Це дослідження повністю відповідає процедурі оцінки "хороших практик" для кількісного оцінювання площі та пов'язаних з нею похибок (Olofsson et al., 2014).

### 1.8.2. Оцінка таксаційних показників за допомогою моделей

Узагальнена регресійна оцінка (GREG) представляє клас оцінок, що базуються на моделях, які використовують допоміжні змінні для всіх одиниць сукупності та допоміжну модель для калібрування оцінки. GREG складається із середнього значення прогнозованих значень для всієї популяції та залишків моделі (розрахованих на основі вибірки). Оцінка середніх значень лісових атрибутів та відповідних дисперсій ґрунтується на рекомендаціях, розроблених для застосування в лісовій інвентаризації (McConville et al., 2020). Для представлення невизначеності використовували розрахунок стандартної похибки оцінки як квадратного кореня з дисперсії. Довірчі інтервали були побудовані на 95% рівні з використанням  $t = 1.96$ .

GREG оцінювання:

$$\hat{\mu}_y = \frac{1}{n} \sum_{i \in S} (y_i - \hat{m}(x_i)) + \frac{1}{N} \sum_{i \in U} \hat{m}(x_i).$$

GREG похибка:

$$\hat{V}(\hat{\mu}_y) = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{1}{n} \frac{1}{n-1} \sum_{i \in S} (y_i - \hat{m}(x_i))^2.$$

Довірчий інтервал середнього значення за допомогою моделі:

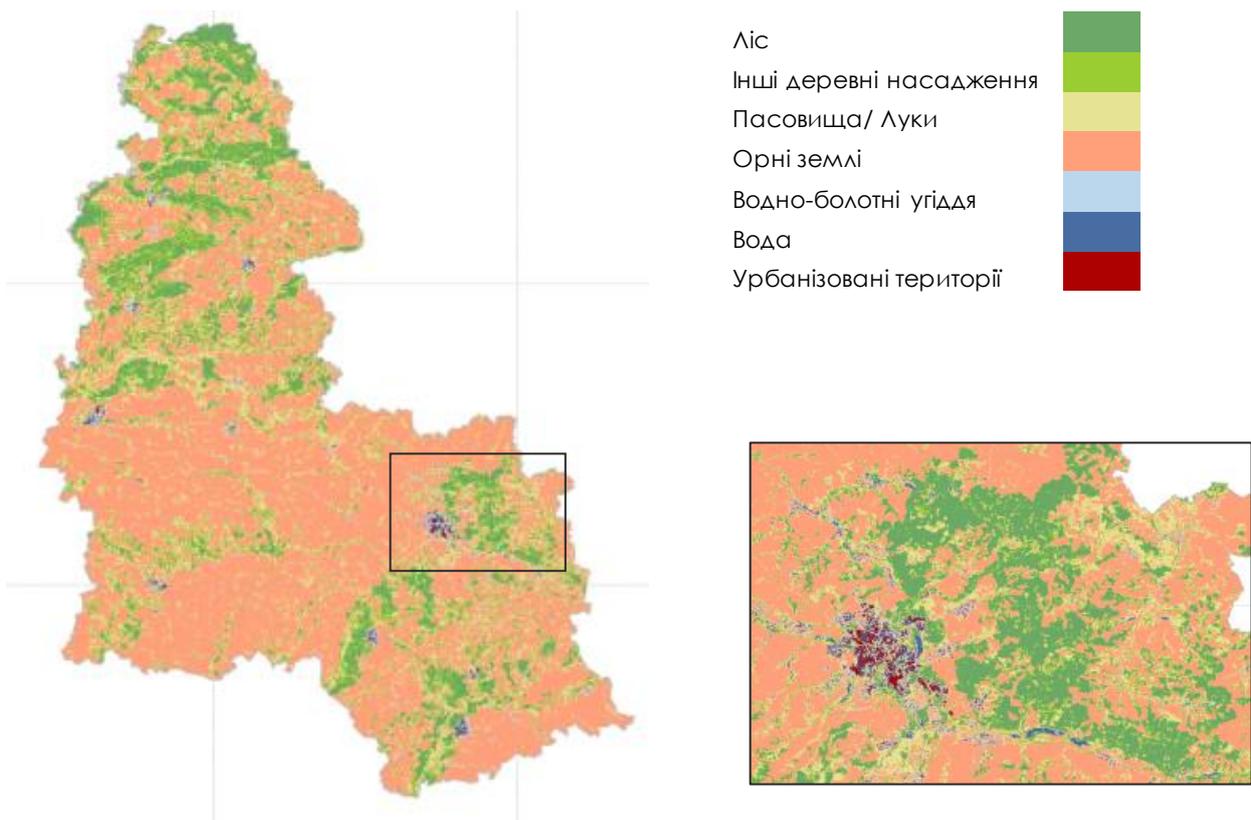
$$\hat{\mu}_y \pm t_{(n-1; 1-\alpha/2)} \cdot \sqrt{v(\hat{\mu}_y)},$$

де  $N$  - скінченна кількість одиниць генеральної сукупності  $U$  (пікселів);  $n$  - кількість відібраних одиниць (ділянок) для вибірки  $S$ ;  $y_i$  - спостережуване значення для  $i$ -ї одиниці;  $\hat{m}(x_i)$  - прогнозоване значення для  $i$ -ї одиниці з урахуванням допоміжних даних  $x$ ;  $t \approx 2$  для 95% довірчого інтервалу.

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ

### 2.1. Площа лісів

Площа лісів для Сумської області була отримана з відповідної карти LC (Рис. 6). Матриці помилок показали, що класифікаційні моделі часових рядів Landsat та Sentinel мають схожий характер помилок. Всі часові ряди змогли правильно класифікувати (головні діагоналі матриць помилок) майже однакові частки загальної площі. Помилки класифікації лісів здебільшого пояснюються плутаниною з іншими деревними насадженнями та луками (з деревами). Варто також зазначити, що оцінки точності, наведені в таблицях 4-7, були отримані на основі лише тих вибірок, для яких під час фотоінтерпретації земельний покрив було визначено з високим рівнем достовірності (575 ділянок, див. Рис. 3).



**Рисунок 6. Земельний покрив в межах Сумської області (2022 р.), одержаний з часових рядів Sentinel 2 (20 м).**

Загалом, точність даних Sentinel 2 була вищою, ніж у часових рядів Landsat. Менший розмір пікселя даних Sentinel 2 дозволив виявити більше лісів. Це можна пояснити неоднорідністю лісів, зокрема вузькими поперечними смугами, які неможливо відобразити на знімках Landsat. З огляду на отримані результати та необхідний обсяг для зберігання наборів даних для регіону на платформі GEE (Landsat (30 м) ~50 Гб; Sentinel 2 (20 м) ~110 Гб; Sentinel 2 (10 м) ~425 Гб), вибір Sentinel 2 (20 м) видається більш обґрунтованим в масштабі України.

**Таблиця 4. Матриця помилок з записами комірок, вираженими у відсотках від загальної площі (Olofsson et al., 2014), для часових рядів Landsat (30 м)**

Дані карти	Вихідні дані								Площа класу, тис. га
	Ліс	ІДН	Луки	Орні землі	Водно-болотні угіддя	Вода	Урб. території	Разом	
Ліс	<b>0.213</b>	0.019	0.002	0	0	0	0	0.235	559.8
ІДН	0.008	<b>0.016</b>	0.014	0	0.003	0	0.003	0.044	103.8
Луки	0	0.016	<b>0.063</b>	0.006	0.003	0	0.005	0.093	222.5
Орні землі	0.002	0	0.01	<b>0.570</b>	0.010	0	0.003	0.596	1420.0
Водно-болотні угіддя	0	0	0	0	<b>0.013</b>	0	0	0.013	31.0
Вода	0	0	0	0	0	<b>0.005</b>	0	0.005	12.7
Урб. території	0	0	0	0	0	0	<b>0.014</b>	0.014	34.3

**Таблиця 5. Матриця похибок із записами клітинок, вираженими у відсотках від загальної площі (Olofsson et al., 2014), отримана для часових рядів Sentinel 2 (20 м)**

Дані карти	Вихідні дані								Площа класу, тис. га
	Ліс	ІДН	Луки	Орні землі	Водно-болотні угіддя	Вода	Урб. території	Разом	
Ліс	<b>0.235</b>	0.015	0	0	0.004	0	0	0.254	606.1
ІДН	0	<b>0.024</b>	0.006	0	0.003	0	0.003	0.036	85.3
Луки	0.002	0.014	<b>0.069</b>	0.005	0.003	0	0.005	0.098	233.5
Орні землі	0.002	0.003	0.013	<b>0.558</b>	0.007	0	0.007	0.589	1404.0
Водно-болотні угіддя	0	0	0.002	0	<b>0.005</b>	0	0	0.006	14.9
Вода	0	0	0	0	0	<b>0.006</b>	0	0.006	13.6
Урб. території	0	0.001	0	0	0	0	<b>0.010</b>	0.011	26.2

**Таблиця 6. Матриця похибок із записами клітинок, вираженими у відсотках від загальної площі (Olofsson et al., 2014), отримана для часових рядів Sentinel 2 (10 м)**

Дані карти	Вихідні дані								Площа класу, тис. га
	Ліс	ІДН	Луки	Орні землі	Водно-болотні угіддя	Вода	Урб. території	Разом	
Ліс	<b>0.232</b>	0.015	0	0	0.002	0	0	0.249	594.0
ІДН	0.005	<b>0.016</b>	0.008	0	0.005	0	0	0.034	81.3
Луки	0.002	0.015	<b>0.071</b>	0.003	0.007	0	0.007	0.105	250.2
Орні землі	0	0.003	0.008	<b>0.565</b>	0.002	0	0.007	0.585	1394.9
Водно-болотні угіддя	0	0.001	0.001	0	<b>0.006</b>	0	0	0.009	20.7
Вода	0	0	0	0	0	<b>0.006</b>	0	0.006	13.9
Урб. території	0	0.001	0	0	0	0	<b>0.011</b>	0.012	28.8

**Таблиця 7. Точність карт FNF для Сумської області**

Зображення набору даних	Залісна територія, тис.га		Оцінка частки площі	Точність користувача (похибки включення)	Точність виконавця (помилки пропуску)	Загальна точність
	Картовано (площа в пікселях)	Оцінено (Olofsson et. al, 2014)				
L30	559.8	531.6±36.2	0.223±0.015	0.909±0.051	0.956±0.039	0.896±0.023
<b>S20</b>	<b>606.1</b>	<b>569.3±30.5</b>	<b>0.239±0.013</b>	<b>0.926±0.047</b>	<b>0.989±0.019</b>	<b>0.906±0.024</b>
S10	594.0	569.3±32.5	0.239±0.014	0.933±0.045	0.971±0.031	0.907±0.023

L30 – Landsat 30-м; S20 – Sentinel 20-м; S10 – Sentinel 10-м.

Підхід на основі CCDC дозволив картографувати динаміку лісистості за допомогою єдиної класифікаційної моделі. Оскільки підхід використовує згладжений в часі часових рядів, отримані результати можуть бути більш узгодженими в часі, ніж у випадку річних мозаїк.

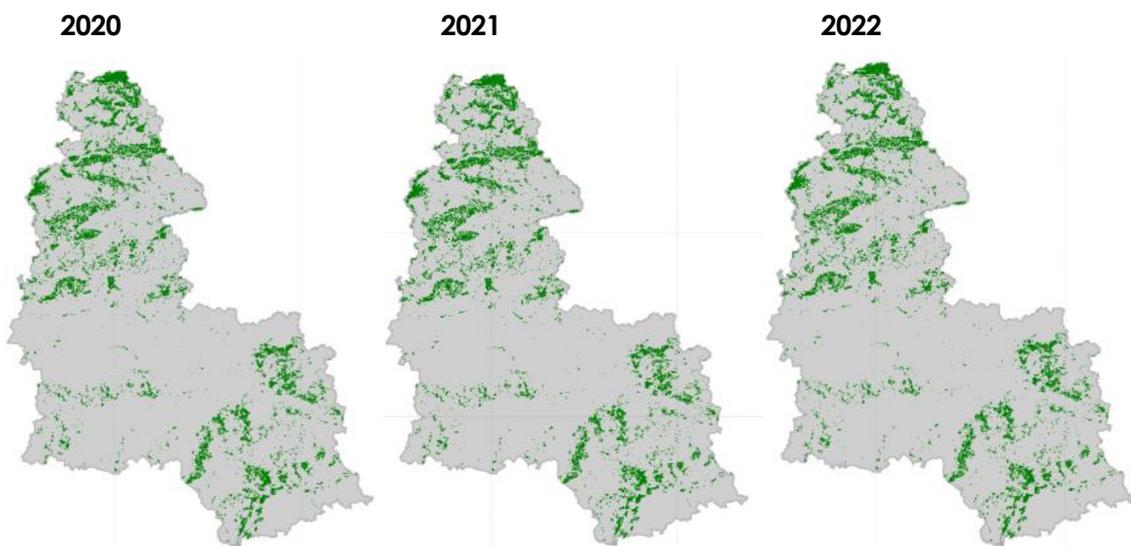


Рисунок 7. Динаміка заліснених площ, отриманих з часових рядів Sentinel 2 (20 м).

## 2.2. Карти деревних порід

### 2.2.1. Карти наявності/відсутності порід

Прогнозування поширення порід (див. приклади на Рис. 8) з використанням порогового значення площі поперечного перерізу  $> 1 \text{ м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$  дало добрі результати (Карра  $> 0,3$ ) для всіх груп порід, за винятком рідкісних (табл. 8). Це можна пояснити тим, що суми площ поперечних перерізів для таких видів, як правило, нижчі за обраний поріг.

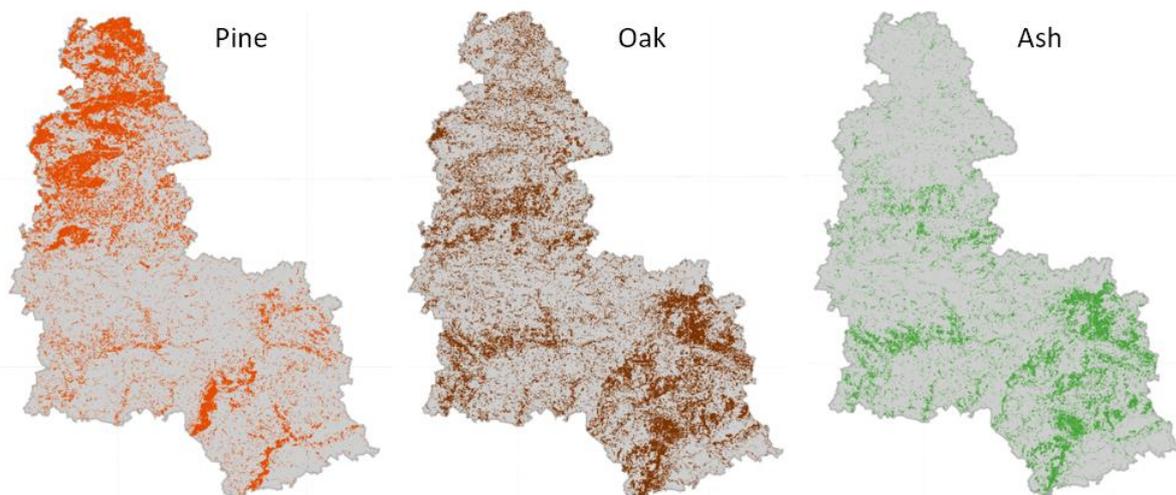


Рисунок 8. Карти наявності/відсутності основних деревних порід на території Сумської області.

**Таблиця 8. Точність картографування деревних порід (наявність/відсутність) на основі моделі GNN (k = 3)**

Групи порід	Розповсюдженість	Кількість спостережень		Cohen's kappa
		OP/PP	OA/PP	
		OP/PA	OA/PA	
Дуб	0.497	45 27	12 61	0.461
Сосна	0.559	64 17	4 60	0.712
Клен	0.289	26 16	8 95	0.574
Липа	0.276	16 24	10 95	0.342
Береза	0.269	20 19	11 95	0.437
Ясен	0.317	23 23	4 95	0.517
Тополя	0.172	11 14	6 114	0.447
Вільха	0.097	5 9	4 127	0.389
Верба	0.069	5 5	2 133	0.563
Інші листяні породи	0.345	25 25	11 84	0.411
Листяні 1 (клен, ясен, липа)	0.448	46 19	7 73	0.631
Листяні 2 (береза, тополя, вільха, верба)	0.434	39 24	12 70	0.483

OP/PP = Спостережувана присутність / Прогнозована присутність; OA/PP = Спостережувана відсутність / Прогнозована присутність

OP/PA = Спостережувана присутність / Прогнозована відсутність; OA/PA = Спостережувана відсутність / Прогнозована відсутність

### 2.2.2. Карта домінуючих порід

Для створення карти домінуючих видів було протестовано два підходи: (i) використання GNN-відновлення значень площі поперечного перерізу на рівні пікселів та (ii) використання дискретної RF-класифікації.

За допомогою GNN можна одночасно передбачити значення площі поперечного перерізу для списку видів, які були виявлені на ділянці. Ця здатність була використана для визначення домінуючих видів за допомогою прогнозованої площі поперечного перерізу. Детальний аналіз моделі GNN показав деякі обмеження щодо її здатності точно прогнозувати суму площ поперечних перерізів окремих видів (Рис. 9). Найбільше це стосується порід, які часто займають схожі екологічні ніші (наприклад, ясен, клен, липа). Виділення площ поперечного перерізу окремих видів з таких лісових угруповань може бути складним, тому модель для ширших груп видів показала кращі результати (Таблиця 9).

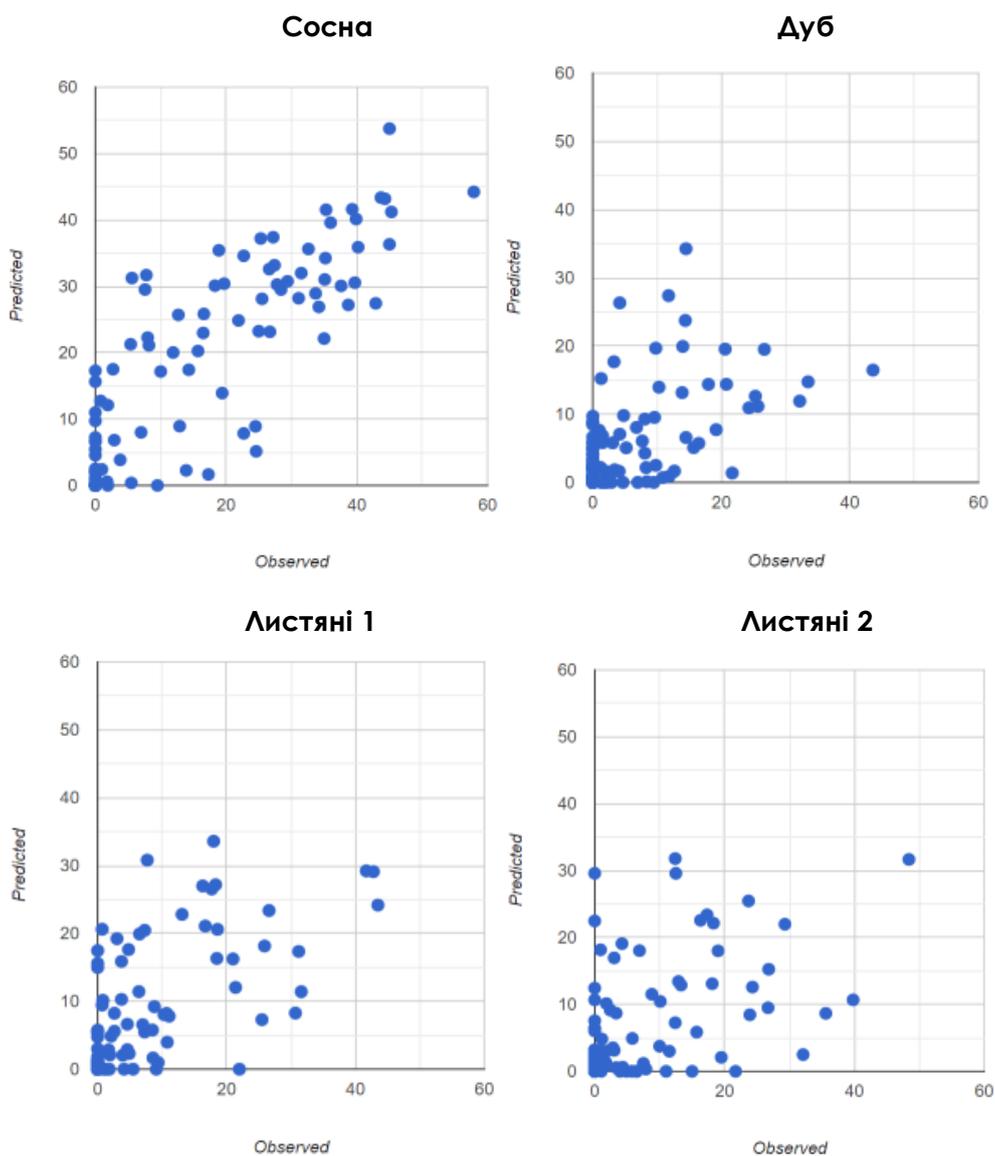
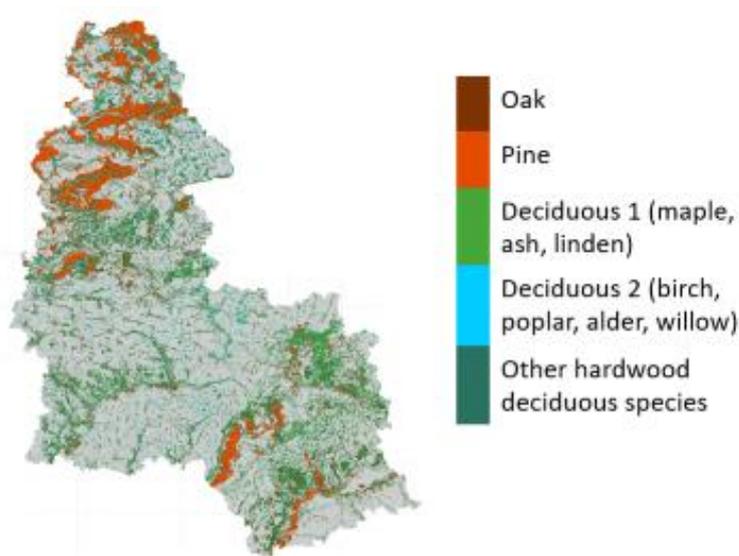


Рисунок 9. Прогнозовані та фактичні значення сум площ поперечних перерізів для груп порід.

**Таблиця 9. Точність прогнозування сум площ поперечних перерізів для груп видів у межах Сумської області з використанням моделі GNN ( $k = 3$ )**

Породи (групи порід)	R <sup>2</sup>
Сосна	0,76
Дуб	0,32
Листяні 1 (клен, ясен, липа)	0,44
Листяні 2 (береза, тополя, вільха, верба)	0,24

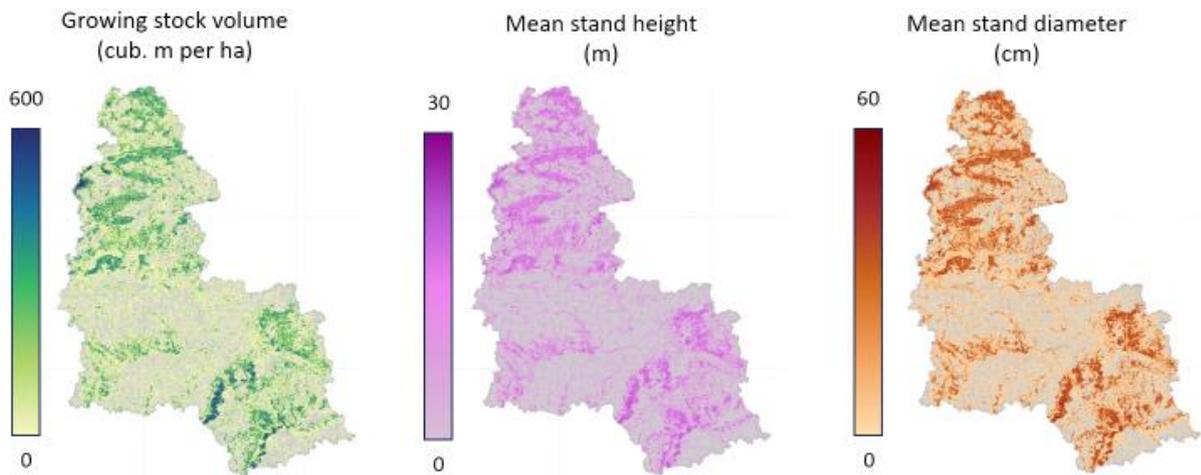
Після детального вивчення похибок карти з точки зору отриманих довірчих інтервалів нанесених на неї площ для кожної групи порід, було застосовано альтернативний підхід з використанням класифікації. По-перше, для кожної ділянки НІЛ були визначені домінуючі види (з максимальною площею поперечного перерізу). По-друге, встановлені домінуючі породи розглядалися як дискретні класи в класифікації.



**Рисунок 10. Карта домінуючих порід в межах Сумської області, отримана за допомогою RF-класифікації.**

### 2.3. Картування лісових атрибутів

Ефективність відображення стовбурового запасу (Рис. 11) пов'язана з прогностичною ефективністю моделі GNN для площі поперечного перерізу. Це можна пояснити сильною кореляцією між GSV і площею поперечного перерізу, тоді як оцінка моделі для площі поперечного перерізу може бути більш однозначною, оскільки на неї не впливає точність рівнянь об'єму, що використовуються для розрахунку GSV. Інші атрибути лісу також можна спрогнозувати, використовуючи той самий растр найближчих сусідів. Порівняння прогнозованих і фактичних значень лісових атрибутів на вибіркових ділянках (Рис. 12) показало, що дані можуть бути досить розкиданими. Можна очікувати отримання кращої точності при більшому масштабі агрегування (наприклад, 5×5 км), що було показано (Myroniuk et al., 2022).



Малюнок 11. Карти кількісних лісових атрибутів в межах Сумської області.

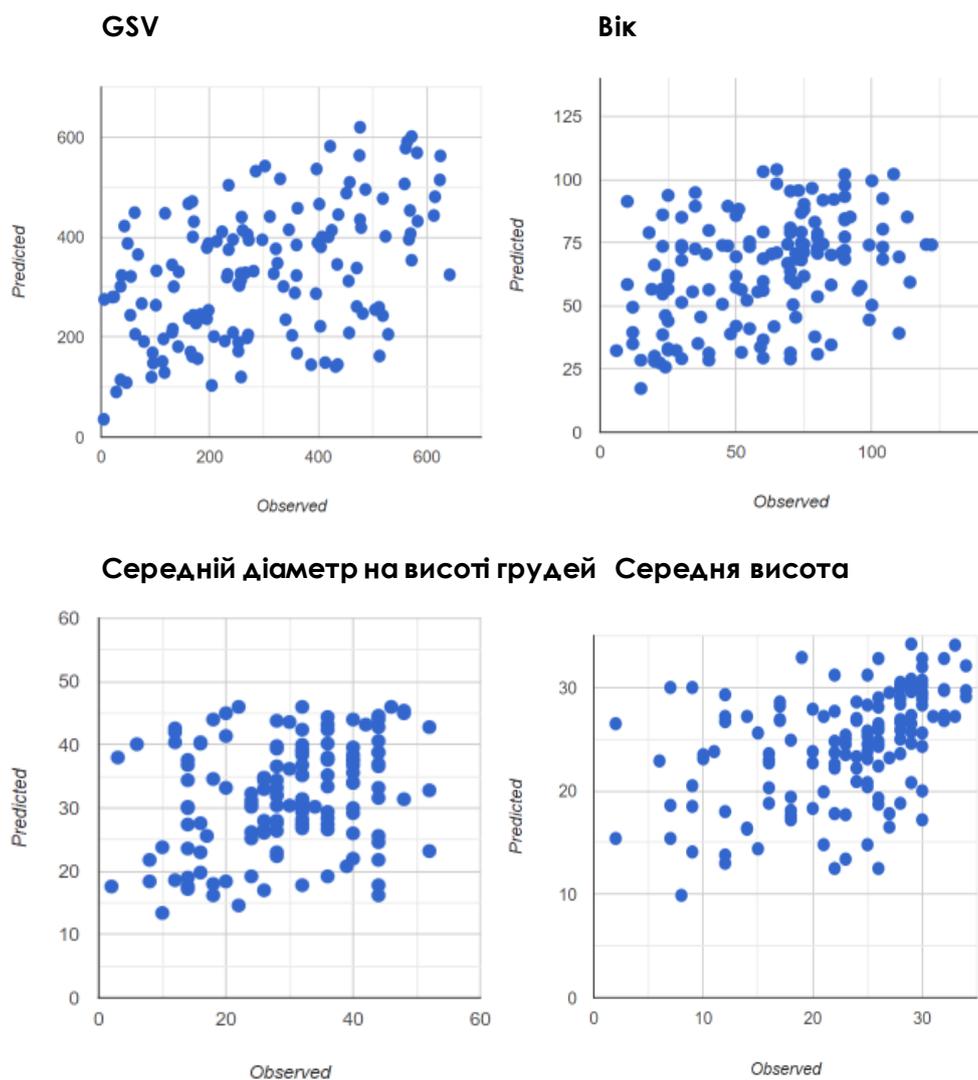
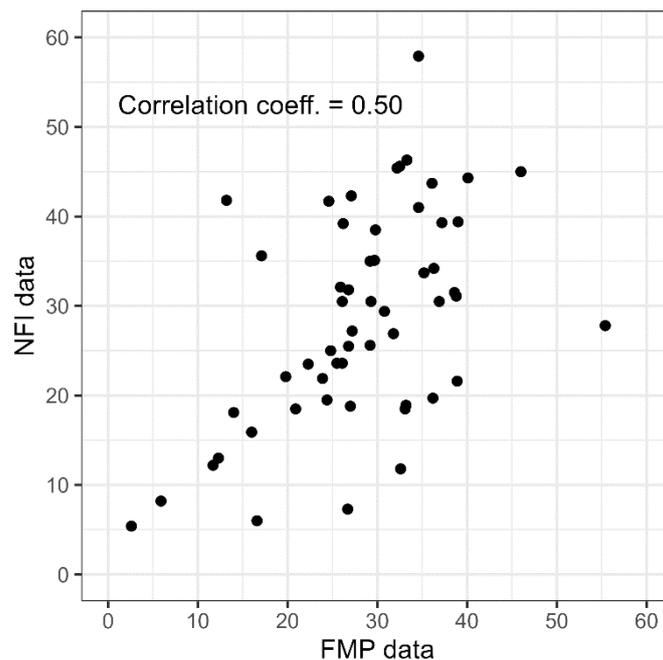


Рисунок 12. Прогнозовані та спостережені значення ключових лісових атрибутів з використанням референтних даних НІЛ.

## 2.4. Роль даних лісовпорядкування в ДЗЗ-Інвентаризації

Традиційно НІА є джерелом незалежної інформації, яка збирається на ділянках вибірки. Запропонована методологія ДЗЗ-Інвентаризації є компромісом між потребою в просторово чітких оцінках атрибутів лісу та наявними польовими даними. В Україні ніколи не існувало даних НІА для великих територій, і вони не можуть бути зібрані з міркувань безпеки. Таким чином, історичні дані лісовпорядкування можуть бути єдиним доступним джерелом вихідних даних для побудови моделей для таких територій.

Дослідження продемонструвало певний потенціал для комбінованого використання НІА та лісовпорядкування в ДЗЗ-Інвентаризації. Оцінки площі поперечного перерізу, отримані для одних і тих самих деревостанів, не мають систематичних помилок, проте мають високу варіабельність (Рис. 13).



**Рисунок 13. Зв'язок між оцінками сум площ поперечних перерізів вибірових деревостанів (n = 96) за даними лісовпорядкування (2018) та НІА (2021).**

Як і у випадку з НІА, для прогнозування лісових атрибутів було використано вибрані 96 деревостанів з даних лісовпорядкування (Рис. 14). Розподіл спостережених і прогнозованих даних був більш розкиданим, ніж у випадку даних НІА. Крім того, переоцінка спостережень на початку діапазонів даних вказує на потенційні обмеження збору польових даних під час проведення лісовпорядкування, коли візуальні оцінки переважають над вимірюваннями. Таким чином, не рекомендується об'єднувати дані лісовпорядкування та НІА для регіонів з наявними спостереженнями на ділянках. Найбільш ефективним підходом було б використання даних лісовпорядкування тільки для регіонів, де немає ділянок НІА.

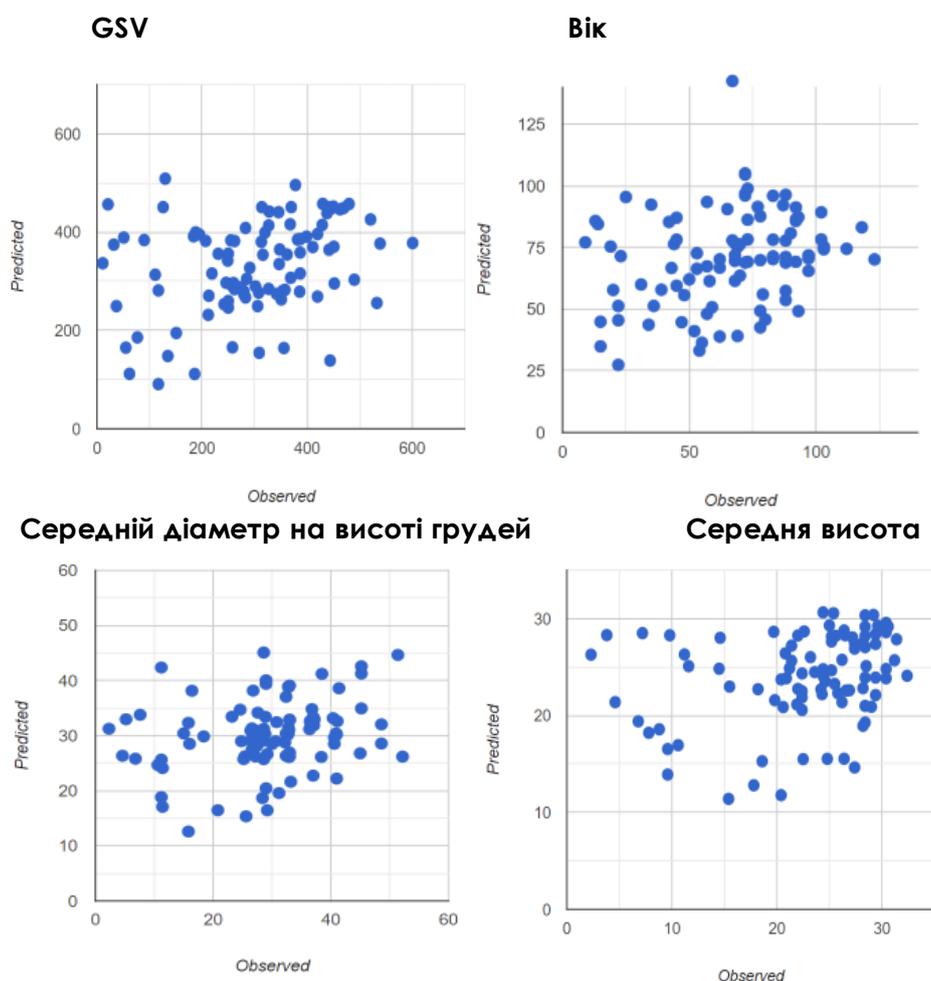


Рисунок 14. Прогнозовані та спостережені значення ключових лісових атрибутів з використанням референтних даних лісовпорядкування.

## 2.5. Оцінки ДЗЗ-Інвентаризації

### 2.5.1. Оцінки лісистості для субпопуляційних одиниць

Площу лісів для субпопуляційних одиниць з 95% довірчим інтервалом можна отримати, використовуючи площу пікселя та відповідну матрицю похибок (див. Таблицю 5). Для прикладу, в Таблиці 10 та Таблиці 11 наведено оцінки для адміністративних районів та громад (територіальних громад).

Таблиця 10. Розподіл лісистості (з 95% довірчими інтервалами) в межах адміністративних районів Сумської області

Адміністративний район (місто районного значення)	Покрита лісом площа, тис. га	Частка лісисті площі
Конотоп	118.8±6.4	0.229±0.012
Охтирка	73.5±4.0	0.230±0.012
Ромни	60.5±3.5	0.156±0.009
Суми	136.6±7.5	0.210±0.012
Шостка	179.9±9.3	0.355±0.018

**Таблиця 11. Розподіл лісистості (з 95% довірчими інтервалами) в межах територіальних громад Сумської області**

<b>Офіційний код територіальної громади</b>	<b>Українська назва територіальної громади</b>	<b>Покрита лісом площа, тис. га</b>	<b>Частка лісистості площі</b>
UA.59060010000042952	Андріяшівська	10,9±0,6	0.180±0.010
UA.59100010000064812	Березівська	15,3±0,8	0.331±0.017
UA.59080010000078468	Бездрицька	2,9±0,2	0.376±0.020
UA.59040010000075530	Боромлянська	7,1±0,4	0.231±0.012
UA.59020010000024157	Бочечківська	12,1±0,6	0.318±0.017
UA.59080030000075526	Білопільська	5,8±0,4	0.106±0.007
UA.59020030000072865	Буринська	8,6±0,6	0.096±0.007
UA.59080050000061215	Верхньосироватська	5,0±0,3	0.283±0.015
UA.59040030000060142	Великописарівська	6,6±0,4	0.129±0.008
UA.59080070000062635	Ворожбянська	1,5±0,1	0.102±0.007
UA.59060030000069916	Вільшанська	4,1±0,2	0.156±0.009
UA.59040050000033127	Грунська	5,7±0,3	0.235±0.013
UA.59100030000078744	Глухівська	12,2±0,6	0.268±0.014
UA.59100050000059594	Дружбівська	5,7±0,3	0.447±0.023
UA.59020050000012539	Дубов'язівська	4,6±0,3	0.088±0.006
UA.59100070000019079	Есманьська	9,8±0,6	0.178±0.010
UA.59100090000041284	Зноб-Новгородська	22,0±1,1	0.415±0.021
UA.59060050000060884	Коровинська	4,4±0,2	0.230±0.012
UA.59040090000041737	Комишанська	2,2±0,1	0.171±0.010
UA.59020070000032449	Конотопська	1,5±0,1	0.147±0.009
UA.59080090000092991	Краснопільська	27,3±1,4	0.281±0.015
UA.59020090000085438	Кролевецька	49,3±2,5	0.384±0.020
UA.59040070000045520	Кириківська	2,8±0,2	0.103±0.007
UA.59080110000034361	Лебединська	44,5±2,4	0.270±0.014
UA.59060070000040784	Липоводолинська	5,0±0,4	0.085±0.006
UA.59080170000056499	Миропільська	7,0±0,4	0.234±0.014
UA.59080130000022249	Миколаївська	4,3±0,3	0.082±0.006
UA.59080150000013842	Миколаївська I	2,6±0,2	0.095±0.007
UA.59060090000012687	Недригайлівська	9,8±0,6	0.167±0.009
UA.59020110000066430	Новослобідська	14,3±0,8	0.277±0.015
UA.59080190000095280	Нижньосироватська	1,9±0,1	0.116±0.009
UA.59040110000026694	Охтирська	3,0±0,2	0.357±0.019
UA.59020130000060377	Попівська	15,0±0,9	0.168±0.010
UA.59020150000078955	Путивльська	13,5±0,8	0.229±0.013
UA.59060110000049734	Роменська	17,0±1,0	0.175±0.010
UA.59080210000075243	Річківська	2,2±0,2	0.097±0.007
UA.59080230000084731	Садівська	6,0±0,3	0.185±0.011
UA.59100110000012703	Свеська	10,6±0,6	0.357±0.019
UA.59100130000041016	Середино-Будська	27,6±1,4	0.466±0.024
UA.59060130000041204	Синівська	3,8±0,2	0.128±0.008
UA.59080250000082875	Степанівська	1,3±0,1	0.067±0.006
UA.59080270000073662	Сумська	12,0±0,6	0.345±0.018
UA.59040130000041676	Тростянецька	26,6±1,4	0.338±0.017
UA.59080290000021284	Хотінська	2,1±0,2	0.087±0.007
UA.59060150000055022	Хмелівська	5,5±0,3	0.143±0.008
UA.59040150000076482	Чернечинська	14,3±0,8	0.243±0.013
UA.59040170000054314	Чупахівська	5,4±0,3	0.196±0.011
UA.59100150000074932	Шалигинська	7,1±0,4	0.258±0.014
UA.59100170000093676	Шосткинська	45,1±2,3	0.359±0.019
UA.59080310000049988	Юнаківська	10,0±0,5	0.290±0.015

Карта домінуючих порід (Рис. 10) була використана для виокремлення піксельних площ для відповідних груп порід. Нанесені на карту площі (пікселі) для кожної групи були скориговані з використанням співвідношення між оціненою та нанесеною на карту загальною площею лісів. Довірчі інтервали для площ, зайнятих домінуючими видами, були отримані з використанням методу "ефективної практики" (Olofsson et al., 2014) та отриманої матриці помилок LOO.

Оцінки вкритих лісом площ також були надані для вікових груп деревостанів. Для зменшення потенційних помилок було використано 40-річні вікові інтервали (Таблиця 13).

**Таблиця 12. Площа деревостанів за групами домінуючих порід (з 95% довірчим інтервалом)**

Група порід	Оцінка (Olofsson et al., 2014)	
	площі	частки
Дуб	101.3±35.0	0.178±0.061
Сосна	213.0±25.1	0.374±0.044
Листяні 1 (клен, ясен, липа)	103.0±34.0	0.181±0.060
Листяні 2 (береза, тополя, вільха, верба)	107.6±35.8	0.189±0.063
Інші твердолистяні породи	44.4±25.0	0.078±0.044
Разом	569.3±30.5	0.239±0.013

**Таблиця 13. Площа лісових насаджень за 40-річними віковими групами**

Вікова група	Лісистість (піксельна площа), тис. га
40 -річні та молодші	143.4
41-80 років	362.9
81 -річні та старші	99.8
Разом	606.1

## 2.5.2. Середні значення лісових атрибутів

Середні значення лісових атрибутів були отримані за допомогою оцінювача GREG (Таблиця 13). Одержані залишки моделі для всіх атрибутів мали від'ємні значення. Вони були застосовані для коригування середніх значень, розрахованих за картами. Довірчі інтервали були розраховані з використанням оцінок, отриманих за допомогою моделі, та стандартних помилок (розрахованих як  $1,98 \times$  квадратний корінь з дисперсії).

**Таблиця 14. Оцінки за допомогою моделей та довірчі інтервали для кількісних характеристик лісів**

Лісовий атрибут	Середнє значення на основі вибірки		Середнє значення на основі карти (N = 24193140)	GREG		
	Спостережується (n = 145)	Прогнозоване (n = 145)		Залишки моделі	Похибка	95% ДІ
Вік (роки)	60	64	60	-4	5.7	56±5
DBH (см)	29.7	32.0	29.9	-2.3	1.03	27.6±2.0
HT (м)	23.0	24.4	22.9	-1.4	0.35	21.5±1.2
BA (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	27.7	29.0	27.7	-1.3	1.05	26.4±2.0
GSV (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	308	334	305	-26	192	282±27

Карти домінуючих порід та вікових груп були використані для отримання середніх значень лісових атрибутів (Таблиця 14, Таблиця 15). Довірчі інтервали для середніх значень лісових атрибутів у групах домінуючих видів були отримані з використанням залишків та оцінених дисперсій моделей (див. Таблицю 13). Враховуючи прогнозні характеристики моделі GNN, вибір вузьких вікових класів (наприклад, 10-річних інтервалів) може призвести до значної невизначеності в оцінках. Тому рішення було прийнято на користь широкіх 40-річних вікових груп.

**Таблиця 14. Середні значення лісових атрибутів за групами домінуючих порід**

Види порід	Вік, роки	DBH, см	HT, м	BA, m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup>	GSV, m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup>
<b>Дуб</b>	66±5	30.3±2.0	23.1±1.2	27.8±2.0	309±27
<b>Сосна</b>	57±5	30.5±2.0	23.5±1.2	29.2±2.0	332±27
Листяні 1 (клен, ясен, липа)	64±5	30.0±2.0	23.6±1.2	26.9±2.0	295±27
Листяні 2 (береза, тополя, вільха, верба)	55±5	28.6±2.0	21.4±1.2	25.8±2.0	225±27

**Таблиця 15. Середні значення лісових атрибутів за 40-річними віковими групами**

Вікова група	Вік, роки	DBH, см	HT, м	BA, m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup>	GSV, m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup>
40-річні та молодші	31	19	15	21	165
41-80-річні	63	32	25	29	330
81-річні та старші	90	38	28	33	417

## ТАБЛИЦІ

---

Таблиця 1. Видові групи Сумської області.....	4
Таблиця 2. Породи-замінники, що використовуються для оцінки ППП з використанням таблиць врожайності. ....	7
Таблиця 3. Розподіл ділянок вибірки за категоріями земного покриття (LC).....	7
Таблиця 4. Матриця помилок з комірками, вираженими у відсотках від загальної площі (Olofsson et al., 2014) отримана для часових рядів Landsat (30 м).....	15
Таблиця 5. Матриця похибок із записами клітинок, вираженими у відсотках від загальної площі (Olofsson et al., 2014) отримана для часових рядів Sentinel 2 (20 м).....	15
Таблиця 6. Матриця похибок із записами клітинок, вираженими у відсотках від загальної площі (Olofsson et al., 2014) отримана для часових рядів Sentinel 2 (10 м).....	15
Таблиця 7. Точність карт FNF для Сумської області.....	16
Таблиця 8. Точність картографування деревних порід (наявність/відсутність) на основі моделі імплікації GNN ( $k = 3$ ).....	18
Таблиця 9. Точність прогнозування площі поперечного перерізу для груп видів у межах Сумської області з використанням моделі імплікації GNN ( $k = 3$ ) .....	20
Таблиця 10. Розподіл лісистості (з 95% довірчими інтервалами) в межах адміністративних районів Сумської області. ....	23
Таблиця 11. Розподіл лісистості (з 95% довірчими інтервалами) в межах територіальних громад Сумської області.....	24
Таблиця 12. Площа деревостанів за групами домінуючих порід (з 95% довірчим інтервалом).....	25
Таблиця 13. Площа лісових насаджень за 40-річними віковими групами.....	25
Таблиця 14. Оцінки за допомогою моделей та довірчі інтервали для кількісних характеристик лісів. ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Таблиця 15. Середні значення лісових атрибутів за групами домінуючих порід. ....	26
Таблиця 16. Середні значення лісових атрибутів за 40-річними віковими групами.....	26

## РИСУНКИ

---

Рисунок 1. Приклад, що демонструє проблему, коли ділянка (ID = 591005414) знаходиться на межі різних лісових насаджень. Коломи позначено ділянки вибірки площею 500 м <sup>2</sup> (радіус ділянки = 12,62 м): білим кольором - ділянки, розташовані в межах одного лісового насадження, фіолетовим кольором - ділянки, розташовані в межах двох різних лісових насаджень.....	5
Рисунок 2. Сукупність даних лісовпорядкування, що перетинають вибіркові ділянки НІЛ в межах 50-метрового буфера.....	5
Рисунок 3. Інтерфейс користувача програми Collect Earth, що використовується для фотоінтерпретації.....	8
Рисунок 4. Розташування Сумської адміністративної області (а) разом з екологічними градієнтами: (b) висота над рівнем моря, (c) середньорічна кількість опадів, (d) максимальна температура в липні, °С.....	9
Рисунок 5. Стандартна 0,5×1 растрова сітка, що покриває Сумську область: (а) комірки, що перетинають межу Сумської області; (b) обрана комірка для обробки; (c) інтегроване синтетичне зображення в межах комірки, що опрацьовується.....	10
Рисунок 6. Земельний покрив в межах Сумської області (2022 р.), одержаний з часових рядів Sentinel 2 (20 м).....	14
Рисунок 7. Динаміка заліснених площ, отриманих з часових рядів Sentinel 2 (20 м).....	17
Рисунок 8. Карти наявності/відсутності основних деревних порід на території Сумської області.....	17
Рисунок 9. Прогнозовані та фактичні значення сум площ поперечних перерізів для груп порід.....	19
Рисунок 10. Карта домінуючих порід в межах Сумської області, отримана за допомогою RF-класифікації.....	20
Малюнок 11. Карти кількісних лісових атрибутів в межах Сумської області.....	21
Рисунок 12. Прогнозовані та спостережені значення ключових лісових атрибутів з використанням референтних даних НІЛ.....	21
Рисунок 13. Зв'язок між оцінками сум площ поперечних перерізів вибірових деревостанів (n = 96) за даними лісовпорядкування (2018) та НІЛ (2021).....	22
Рисунок 14. Прогнозовані та спостережені значення ключових лісових атрибутів з використанням референтних даних лісовпорядкування.....	23

## ВИСНОВКИ

---

Тематичне дослідження для Сумської області продемонструвало переваги ДЗЗ-Інвентаризації в ситуації, коли доступні лише обмежені польові дані. Окрім планової інвентаризації лісів, запропонований підхід забезпечує основу для картографування лісів та оцінки стану лісів. У цьому відношенні ДЗЗ-Інвентаризація перевершує традиційну інвентаризацію лісів на основі збору даних. Однак, тематичне дослідження також виявило деякі обмеження підходу через різні фактори, що впливають на точність прогнозних моделей.

По-перше, це дослідження ґрунтується на обмеженій кількості спостережень, що є недостатнім для отримання досить надійних оцінок за допомогою підходів, що базуються на моделях або не базуються на моделях. Для підвищення ефективності запропонованого підходу необхідно збільшити розмір вибірки референтних спостережень. Таким чином, існують вагомі аргументи на користь обробки даних для більших, ніж один регіон, територій. Об'єднання польових даних із суміжних областей може бути можливим рішенням для вирішення цієї проблеми.

По-друге, неправильна реєстрація координат центрів ділянок також може бути проблемою. Знімки високої роздільної здатності можна використовувати для видалення ділянок, які мають очевидні помилки з координатами. Ділянки, які межують з різними лісовими насадженнями або категоріями земного покриття, також можуть впливати на точність моделювання. Важливість цієї проблеми зростає зі збільшенням фрагментованості лісів. Загалом, рекомендується не включати ділянки, розташовані на узліссях лісових масивів, до референтних наборів даних або приймати такі рішення на основі візуального огляду кожної ділянки з використанням знімків високої роздільної здатності.

По-третє, дослідження показало, що точність моделей покращується для груп порід. Можна надати лише загальні рекомендації щодо групування, оскільки структура лісів в Україні є різною. Так, породи слід об'єднувати в групи, якщо вони займають схожі екологічні ніші (наприклад, породи, що ростуть у мішаних деревостанах).

По-четверте, оцінка точності в цьому дослідженні проводилася на рівні 20-метрових пікселів, тоді як більшість рішень щодо ведення лісового господарства приймаються щонайменше на рівні деревостанів. З цієї точки зору, точність моделей буде кращою для більш високого масштабу агрегації.

По-п'яте, концепція ДЗЗ-Інвентаризації, яка використовує тимчасово вирівняні часові ряди супутникових знімків, передбачає застосування всіх наявних історичних даних польових досліджень. Очікується, що моделі, які включають як історичні, так і нещодавно зібрані ділянки вибірки, матимуть вищу точність.

## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК 1. ПАРАМЕТРИ ЖИВОЇ БІОМАСИ ЛІСУ (EQ. (A1))

Частка живої біомаси	Рівняння (A1) параметрів оцінювання (Bilous et al., 2017)						RMSD
	$\hat{a}_0$	$\hat{a}_1$	$\hat{a}_2$	$\hat{a}_3$	$\hat{a}_4$	$\hat{a}_5$	
	Сосна (Shvidenko et al., 2007)						
Стовбур	0.26990	0.08399	0.14600	0.00984	-0.00113	-0.10480	0.069
Гілля	0.27380	-0.73450	0.71230	-0.07102	0.00429	-0.33160	0.033
Листя	0.43760	-1.14000	1.23500	0.41980	0.00307	-0.77010	0.023
Коріння	0.05534	-0.21860	0.64560	-0.32960	0.00045	0.32010	0.061
ЖНП	0.03920	0.66900	0.14100	-1.70000	-0.00396	-0.92000	1.576
Підлісок	0.00258	2.65800	-0.82430	0.74390	-0.01512	-1.97200	1.384
	Береза						
Совбур	0.43850	0.04412	-0.01376	-0.07286	-0.00064	0.00796	0.061
Гілля	0.01383	-0.02150	0.18670	-1.43800	0.00113	1.09400	0.038
Листя	0.04388	-0.72620	0.35420	-0.92660	0.00392	0.96070	0.018
Коріння	0.22690	-0.48550	1.08200	0.42080	0.00580	-0.62770	0.053
ЖНП	88.1900	-0.36490	0.31670	2.35500	0.02050	-4.43900	1.576
Підлісок	0.68430	1.14400	0.95050	3.32300	-0.00634	-5.28500	1.384
	Чорна вільха						
Стовбур	0.42310	0.03063	-0.03498	-0.01347	-0.00002	0.00003	0.036
Гілля	0.01997	-0.44310	0.99660	-0.65910	0.00361	0.20570	0.013
Листя	0.00679	-0.62360	1.34800	-0.88740	-0.00601	0.33290	0.005
Коріння	1.50300	-0.39290	0.56250	1.45300	0.00320	-2.40900	0.044
ЖНП	12.5400	0.42700	0.42800	2.75400	0.00073	-4.30100	1.048
Підлісок	0.00032	1.06800	0.21400	-3.24500	-0.00298	3.95100	0.635
	Осика						
Стовбур	0.44380	-0.02559	0.02371	-0.00506	0.00047	-0.00777	0.066
Гілля	0.16980	-0.35910	0.48230	0.79180	0.00725	-0.47330	0.028
Листя	0.01652	-0.72700	0.71050	-0.92820	-0.00049	1.27100	0.005
Коріння	1.06900	-0.33720	0.24350	0.73940	0.00070	-1.18500	0.043
ЖНП	84.1800	-0.08300	0.56000	2.72600	0.01110	-5.51200	1.766
Підлісок	0.98800	0.35000	0.50300	1.42400	0.01100	-1.99600	2.731
	Дуб (Shvidenko et al., 2007)						
Стовбур	0.57400	-0.04679	0.09587	0.02519	0.00080	-0.01498	0.082
Гілля	0.03194	-0.44630	1.25300	-0.60530	0.00193	0.61700	0.075
Листя	0.01828	-0.35940	0.89200	-0.15230	-0.00776	0.32760	0.012
Коріння	0.07831	-0.62020	1.46700	-0.30380	0.00316	0.30390	0.094
ЖНП	0.18870	0.05998	0.60810	-1.73500	0.00051	0.92440	1.790
Підлісок	0.00033	2.13900	-0.40800	-1.83300	-0.01794	2.12700	1.735

Живу біомасу всіх деревостанів можна розрахувати наступним чином:

$$R_{fr} = \frac{M_{fr}}{GSV} = a_0 + A^{a_1} \cdot SI^{a_2} \cdot RSt^{a_3} \cdot \exp(a_4 \cdot A + a_5 \cdot RSt), \quad (A1)$$

де  $R_{fr}$  - коефіцієнт розростання біомаси;  $M_{fr}$  - жива біомаса фракції  $fr$ , суха речовина т-га<sup>-1</sup>;  $GSV$  - об'єм приросту мЗ;  $A$  - вік, років;  $RSt$  - відносна залісненість;  $SI$  - індекс ділянки, який відображає якість ділянки (Shvidenko et al., 2007);  $a_0$ - $a_5$  - параметри моделі.

## ЛІТЕРАТУРА

---

1. ABATZOGLOU, J. T., DOBROWSKI, S. Z., PARKS, S. A., & HEGEWISCH, K. C. (2018). TERRACLIMATE, A HIGH-RESOLUTION GLOBAL DATASET OF MONTHLY CLIMATE AND CLIMATIC WATER BALANCE FROM 1958–2015. *SCIENTIFIC DATA*, 5(1), 170191. [HTTPS://DOI.ORG/10.1038/SDATA.2017.191](https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191)
2. BEY, A., SÁNCHEZ-PAUS DÍAZ, A., MANIATIS, D., MARCHI, G., MOLLICONE, D., RICCI, S., BASTIN, J.-F., MOORE, R., FEDERICI, S., REZENDE, M., PATRIARCA, C., TURIA, R., GAMOGA, G., ABE, H., KAIDONG, E., & MICELI, G. (2016). COLLECT EARTH: LAND USE AND LAND COVER ASSESSMENT THROUGH AUGMENTED VISUAL INTERPRETATION. *REMOTE SENSING*, 8(10), 807. [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/RS8100807](https://doi.org/10.3390/rs8100807)
3. BILOUS, A. M., KASHPOR, S. M., MYRONIUK, V. V., SVYNCHYK, V. A., & LESNIK, O. M. (EDS.). (2020). *FOREST INVENTORY HANDBOOK*. DNIPRO: LIRA LTD, 2020, 364 [IN UKRAINIAN].
4. 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](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8352)
5. BREIMAN, L. (2001). RANDOM FORESTS. *MACHINE LEARNING*, 45(1), 5–32. [HTTPS://DOI.ORG/10.1023/A:1010933404324](https://doi.org/10.1023/A:1010933404324)
6. CRIST, E. P., & CICONE, R. C. (1984). COMPARISONS OF THE DIMENSIONALITY AND FEATURES OF SIMULATED LANDSAT-4 MSS AND TM DATA. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 14(1–3), 235–246. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/0034-4257\(84\)90018-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90018-X)
7. FOGA, S., SCARAMUZZA, P. L., GUO, S., ZHU, Z., DILLEY, R. D., BECKMANN, T., SCHMIDT, G. L., DWYER, J. L., JOSEPH HUGHES, M., & LAUE, B. (2017). CLOUD DETECTION ALGORITHM COMPARISON AND VALIDATION FOR OPERATIONAL LANDSAT DATA PRODUCTS. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 194, 379–390. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.RSE.2017.03.026](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026)
8. 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](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031)
9. KEY, C. H., & BENSON, N. C. (2006). *LANDSCAPE ASSESSMENT (LA): SAMPLING AND ANALYSIS METHODS (GENERAL TECHNICAL REPORT RMRS-GTR-164; FIREMON: FIRE EFFECTS MONITORING AND INVENTORY SYSTEM, P. LA-1-LA-51)*. ROCKY MOUNTAIN RESEARCH STATION, US DEPARTMENT OF AGRICULTURE, FOREST SERVICE.
10. MATSALA, M., MYRONIUK, V., BORSUK, O., VISHNEVSKIY, D., SCHEPASCHENKO, D., SHVIDENKO, A., KRAXNER, F., & BILOUS, A. (2023). WALL-TO-WALL MAPPING OF CARBON LOSS WITHIN THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE AFTER THE 2020 CATASTROPHIC WILDFIRE. *ANNALS OF FOREST SCIENCE*, 80(1), 26. [HTTPS://DOI.ORG/10.1186/S13595-023-01192-W](https://doi.org/10.1186/s13595-023-01192-w)

11. MCCONVILLE, K. S., MOISEN, G. G., & FRESCINO, T. S. (2020). A TUTORIAL ON MODEL-ASSISTED ESTIMATION WITH APPLICATION TO FOREST INVENTORY. *FORESTS*, 11(2), 244. [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/F11020244](https://doi.org/10.3390/F11020244)
12. 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](https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2022.120184)
13. 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](https://doi.org/10.1139/X02-011)
14. OLOFSSON, P., FOODY, G. M., HEROLD, M., STEHMAN, S. V., WOODCOCK, C. E., & WULDER, M. A. (2014). GOOD PRACTICES FOR ESTIMATING AREA AND ASSESSING ACCURACY OF LAND CHANGE. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 148, 42–57. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.RSE.2014.02.015](https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.02.015)
15. SHVIDENKO, A., SCHEPASCHENKO, D., NILSSON, S., & BOULOUI, Y. (2007). SEMI-EMPIRICAL MODELS FOR ASSESSING BIOLOGICAL PRODUCTIVITY OF NORTHERN EURASIAN FORESTS. *ECOLOGICAL MODELLING*, 204, 163–179.
16. WEISS, A. (2001). TOPOGRAPHIC POSITION AND LANDFORMS ANALYSIS. [POSTER PRESENTATION]. ESRI USER CONFERENCE, SAN DIEGO, CA.
17. 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](https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.01.011)