

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ННІ лісового і садово-паркового господарства

ПОГОДЖЕНО

Директор ННІ лісового і
садово-паркового господарства

_____ Роман ВАСИЛИШИН
(підпис)

« _____ » _____ 20 __ р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри лісівництва

_____ Наталія ПУЗРІНА
(підпис)

« _____ » _____ 20 __ р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: Цифрові інструменти для збору даних, поширення лісівничих
практик та дистанційного навчання в лісовому господарстві

Спеціальність 205 «Лісове господарство»

Освітня програма Лісове господарство
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

канд. с.-г. наук, доцент

_____ (підпис)

Олександр БАЛА

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

канд. с.-г. наук, доцент

_____ (підпис)

Олександр СОШЕНСЬКИЙ

Виконав

_____ (підпис)

Олексій БІЛЯТИНСЬКИЙ

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЛІСОВОГО І САДОВО-ПАРКОВОГО ГОСПОДАРСТВА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри лісівництва

канд. с.-г. наук, доцент_ Наталія ПУЗРІНА

«_____» _____ 20 _____ року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Білятинському Олексію Леонідовичу

Спеціальність: 205 «Лісове господарство»

Освітня програма: Лісове господарство

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

Тема магістерської роботи: «Цифрові інструменти для збору даних, поширення лісівничих практик та дистанційного навчання в лісовому господарстві».

Затверджена наказом ректора НУБіП України: від 13.10.2025 р. № 2324 «С»

Термін подачі завершеної роботи на кафедру: 10.11.2025 р.

Вихідні дані до магістерської роботи: польові дані, цифрові дані про ліси, фотоматеріали, наукова література.

Перелік питань що підлягають дослідженню:

1. Описати постановку проблеми та її актуальність;
2. Виконати короткий огляд наукової літератури відповідно до тематики;
3. Навести коротку характеристику об'єкта та предмета дослідження;
4. Зібрати інформацію для написання роботи;
5. Виконати аналіз та синтез зібраної інформації;
6. Навести результати роботи;
7. Зробити висновки та рекомендації за результатами виконаної роботи.

Дата видачі завдання 10.10.2024 р.

Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи _____

Олександр СОШЕНСЬКИЙ

Завдання прийняла до виконання _____

Олексій БІЛЯТИНСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота на тему «Цифрові інструменти для збору даних, поширення лісівничих практик та дистанційного навчання в лісовому господарстві» містить 91 сторінки, 16 рисунків.

Перелік літературних посилань нараховує 60 найменувань.

Магістерська робота включає реферат, вступ, три розділи, список використаних літератур та додатків. Результати роботи відображені у вигляді зображень, рисунків.

Перший розділ присвячений теоретичним аспектам дослідження цифрових систем для використання у лісовому господарстві.

Другий розділ присвячено методиці збору, та обробки інформації.

Третій розділ магістерської роботи присвячено застосування цифрових інструментів для поширення лісівничих практик та дистанційного навчання.

В третьому розділі описано перспективи розвитку та рекомендації щодо впровадження цифрових інструментів в Україні.

Ключові слова: цифрові системи, лісівничі практики, фотосфери в навчанні, лідар, радар, дрони, ліс, віртуальний тур, VR/AR.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	1
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ У ЛІСОВОМУ ГОСПОДАРСТВІ	3
1.1. Цифрова трансформація лісового господарства: концепції та світовий досвід.....	3
1.2. Огляд існуючих цифрових інструментів для збору даних	21
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ЗБОРУ, ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ ДОСЛІДНОГО МАТЕРІАЛУ	33
2.1. Methodика збору дослідних даних	33
2.2. Характеристика дослідного матеріалу	37
РОЗДІЛ 3 ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ПОШИРЕННЯ ЛІСІВНИЧИХ ПРАКТИК ТА ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ	42
3.1. Цифрові платформи та інструменти для обміну знаннями та поширення передового досвіду в лісівництві.....	42
3.2. Розробка та впровадження систем дистанційного навчання для фахівців лісового господарства	50
3.3. Приклади успішного використання цифрових інструментів для підвищення кваліфікації та навчання лісівників	59
РОЗДІЛ 4 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ В УКРАЇНІ	66
4.1. Аналіз нормативно-правової бази та інфраструктурних умов для впровадження цифрових рішень у лісовому господарстві України.....	66
4.2. Рекомендації щодо інтеграції цифрових інструментів у систему лісового господарства України.....	69
4.3. Перспективи розвитку цифрових технологій у лісовому господарстві та їх вплив на розвиток галузі.....	73
ВИСНОВКИ	77
РЕКОМЕНДАЦІЇ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	80

ВСТУП

Магістерська кваліфікаційна робота є актуальною у зв'язку з активним впровадженням цифрових технологій у різні сфери діяльності. У лісовому господарстві це відкриває нові можливості для оптимізації управлінських рішень, підвищення ефективності роботи, поширення інноваційних практик та якісної підготовки фахівців за допомогою дистанційного навчання. Сучасний світ стрімко змінюється, і лісове господарство не є винятком. Щоб ефективно управляти лісами, захищати їх та використовувати їхні ресурси раціонально, нам потрібні нові підходи. Традиційні методи збору інформації про ліс, поширення знань серед лісівників та навчання молодих фахівців вже не завжди відповідають викликам часу.

Метою роботи є аналіз та впровадження сучасних цифрових інструментів для вдосконалення лісівничих процесів та підготовки майбутніх спеціалістів у цій галузі. Ми розглянемо три основні напрямки: Збір даних про ліс: Замість паперових карт і ручного запису, ми дізнаємося, як сучасні цифрові технології дозволяють швидко та точно збирати інформацію про дерева, ґрунт, тваринний світ та інші важливі аспекти лісу. Це може бути використання спеціальних програм на планшетах, дронів, що роблять знімки з висоти, або навіть супутникових даних. Поширення лісівничих практик: Важливо, щоб найкращі методи догляду за лісом, боротьби зі шкідниками чи відновлення лісових ділянок були доступні всім лісівникам. Ми з'ясуємо, як цифрові платформи, мобільні додатки чи онлайн-ресурси можуть допомагати ділитися цими знаннями та досвідом. Дистанційне навчання в лісовому господарстві: Щоб стати хорошим лісівником, потрібні знання. Але не завжди є можливість їхати в університет чи на курси. Ми проаналізуємо, як онлайн-курси, вебінари та інші форми дистанційного навчання можуть допомогти майбутнім та вже працюючим лісівникам отримати необхідні навички, не виходячи з дому. Використання таких цифрових інструментів може зробити лісове господарство більш ефективним, сучасним та стійким. Робота

спрямована на пошук рішень підтримки управління лісовими ресурсами. В роботі досліджено, як технології можуть допомогти краще дбати про ліс.

Об'єктом дослідження є цифрові інструменти в лісовому господарстві.

Предметом дослідження є особливості використання та впровадження цифрових інструментів в лісовому господарстві України.

Робота складається зі змісту, вступу, реферату, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ У ЛІСОВОМУ ГОСПОДАРСТВІ

1.1. Цифрова трансформація лісового господарства: концепції та світовий досвід

Лісова промисловість – сукупність галузей і виробництв, підприємства яких здійснюють вирощування, заготівлю деревини, її комплексну обробку і переробку. Об'єднує підприємства з заготівлі та переробки деревини та інших лісових багатств (лікарської сировини, ягід, плодів, грибів). Основні галузі: лісозаготівельна, деревообробна, целюлозно-паперова і лісохімічна.

Термін «інновації» або «трансформації» вперше використав австрійський та американський економіст Йозеф Шумпетер на початку ХХ століття. Під ними він розумів зміни з метою реалізації й використання нових видів товарів, виробничих та транспортних засобів, ринків [16].

Цифрова трансформація є глобальним трендом, що охоплює всі сфери економіки та суспільного життя, і лісове господарство не є винятком. Цей процес передбачає інтеграцію цифрових технологій в усі аспекти діяльності, що фундаментально змінює способи функціонування галузі, надання цінності споживачам та управління ресурсами. Зміни та порушення, що виникли в результаті цифрової трансформації, означають, що ми живемо в часи великих перспектив і великих небезпек. Світ має потенціал підключити мільярди людей до цифрових мереж, значно підвищити ефективність організацій і навіть управляти активами таким чином, щоб допомогти відновити природне середовище, потенційно усунувши шкоду, завдану попередніми промисловими революціями.

Для початку слід розглянути, що собою являє термін «діджиталізація». Так, він походить від англійського «digitalization» і в дослівному перекладі означає «оцифровування», «цифровізація» або «приведення в цифрову

форму». У науковій літературі поняття «діджиталізація» розглядається в багатьох значеннях, приміром: як перехід інформаційного поля на цифрові технології [1]; як спосіб приведення будь-якого різновиду інформації в цифрову форму [2]; процес переведення певного інформаційного поля з аналогового у цифровий формат для більш легкого подальшого використання на сучасних електронних девайсах [3]; інформаційно-комунікаційний процес, що забезпечується через використання автоматизованих, інформаційних, телекомунікаційних та електронних технологій і є його важливим елементом [4].

На основі вищезазначеного можна дійти висновку, що дефініцію «діджиталізація» можна інтерпретувати як процес аналізу, використання, застосування, перенесення та переведення інформації у цифровий формат з метою поліпшення та вдосконалення регулювання суспільних відносин, в тому числі і лісових. В зарубіжній юридичній літературі зустрічається таке поняття як «цифровізація лісу».

«Цифровізація лісу» передбачає стійке впровадження передових технологій у лісах для покращення поточних тенденцій, які використовуються для моніторингу лісового середовища, збору даних та аналізу в галузі досліджень і розробок [5].

Цифрова трансформація лісового господарства, яку часто називають "Ліс 4.0" (Forest 4.0) за аналогією з Індустрією 4.0, – це комплексна інтеграція передових технологій для підвищення ефективності, сталості та прозорості лісоуправління. Це перехід від традиційних, трудомістких методів до інтелектуальних, автоматизованих систем, що ґрунтуються на даних [2].

Ключові технологічні напрямки та їх застосування:

1. Сенсорні мережі:

Принцип: Розгортання мереж бездротових датчиків, які в режимі реального часу збирають екологічні дані.

Застосування: Датчики, вбудовані в ґрунт, дерева або розміщені в лісових масивах, можуть моніторити вологість, температуру, рівень

вуглекислого газу, концентрацію шкідників та навіть інтенсивність росту дерев. Це дозволяє вчасно виявляти аномалії, попереджати про загрози пожеж, спалахи хвороб та адаптувати методи управління до змін клімату. У статті "Sensors for Digital Transformation in Smart Forestry" детально описано, як різні типи сенсорів сприяють збору високоякісних даних, необхідних для успішної трансформації.

Технологія збору даних за допомогою лазера в основному зосереджена на різних аспектах збору даних за допомогою нових наземних технологій, придатних для захоплення та створення 3D-хмар точок окремих дерев, а також лісових екосистем. Основна увага приділяється лазерному скануванню (наземному та мобільному), фотограмметрії (статичній, мобільній, багатокамерній) та датчикам глибини (наприклад, Azure Kinect або нові датчики на iPhone).

Збір даних за допомогою лазера розробить рекомендації та протоколи щодо збору даних з використанням визначених нових наземних технологій для досліджень у галузі точного лісівництва та лісової екології. Рекомендації та протоколи будуть розроблені на основі огляду опублікованих статей, досвіду та результатів, наданих усіма залученими членами, попередніх бенчмаркінгу тощо. Іншим видом діяльності буде створення контрольних показників на основі вже наявних даних або впроваджених через навчальні школи, STSM або зустрічі РГ [16].

Новітні наземні технології відіграватимуть важливу роль у вирішенні цих проблем. Такі технології зазнали швидкого розвитку в останні роки. Ліси тепер можна спостерігати та контролювати з дуже високою просторовою та часовою роздільною здатністю, що було неможливо ще кілька років тому. Дослідники та практики мають унікальну можливість поглибити розуміння лісових екосистем та змінити лісове господарство відповідно до кліматичних, екологічних та промислових змін. Різні дослідницькі групи в ЄС та за його межами тестують такі технології або розробляють алгоритми обробки для

точного лісівництва та лісової екології. Але подальша співпраця вкрай необхідна.

Проект 3DForEcoTech має на меті створити потужну мережу вчених та зацікавлених сторін (тобто практиків) і виробників датчиків для синхронізації знань, розробки загальних протоколів та алгоритмів для дослідження стану лісових екосистем та функціонування лісів, а також зробити ці новітні технології доступними для широкої аудиторії. Зокрема, 3DForEcoTech розробить протоколи для збору, обробки та об'єднання даних для інвентаризації лісів, лісовпорядкування та екологічних застосувань, а також створить бази даних з відкритими даними та алгоритмами з відкритим вихідним кодом.

2) Штучний інтелект (AI) та аналіз великих даних (Big Data):

Принцип: Використання алгоритмів машинного навчання для обробки величезних масивів даних, отриманих із сенсорів, супутників та безпілотників.

Застосування: ШІ-системи можуть автоматично ідентифікувати види дерев, оцінювати їхній вік, обсяг деревини та стан здоров'я. Прогностичні моделі на основі Big Data допомагають оптимізувати плани рубок, маршрути транспортування, а також прогнозувати поширення лісових пожеж і вплив кліматичних змін. Публікація «Digital transformation of the future of forestry: an exploration of key concepts in the principles behind Forest 4.0» наголошує на ролі ШІ та Big Data у створенні «розумного лісу» та підвищенні точності лісової інвентаризації.

3) Дистанційне зондування (ДЗЗ) та безпілотні літальні апарати (БПЛА):

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) та безпілотні літальні апарати (БПЛА) є одними з найважливіших інструментів цифрової трансформації лісового господарства. Ці технології дозволяють отримувати актуальні, високоточні та деталізовані дані про стан лісових масивів, що раніше було неможливим або вимагало значних ресурсів. БПЛА забезпечують надзвичайно високу роздільну здатність зображень (до 1 см на піксель), що робить їх ідеальними для детальної інвентаризації окремих ділянок. Дрони можуть

створювати точні 3D-моделі лісів, які дозволяють визначати висоту дерев, щільність насаджень та обсяг деревини. За допомогою БПЛА можна значно скоротити час, необхідний для традиційних лісовпорядних робіт.

Запровадження методів дистанційного сканування лісів за допомогою технології LIDAR. Це потрібно для визначення актуального об'єму на ділянці, який часто є вищим, ніж це вказано в паперах. Ми стикаємося з цією технологією навіть у побуті – наприклад, з її допомогою працює робот-пилосос, який сканує об'єкти в кімнаті й прокладає маршрут для прибирання.

Технології Radar&Lidar стали незамінними в численних сферах – від конструювання автономних автомобілів до моніторингу погоди. Обидві технології функціонують за спільним принципом активного дистанційного зондування навколишнього середовища шляхом посилення сигналів та аналізу їхнього відбиття. Лідар є пристроєм, у якому використовують світлові хвилі. Радар випромінює радіохвилі. Останніми роками обидва типи зондування стали провідними технологіями, які застосовують для виявлення та картографування об'єктів.

Термін LiDAR є скороченням від light detection and ranging. Лідар – це геопросторова технологія, заснована на випромінюванні та передачі сфокусованої світлової хвилі та виміру часу, який потрібен для її відображення від перешкоди. Коли лазерний промінь натикається на об'єкт, наприклад, дерево чи будівлю, частина світла відбивається від нього в напрямку датчика. Засікаючи точний час повернення кожного лазерного імпульсу, система може розрахувати відстань до кожної відбитої точки. В основі цих розрахунків лежить метод визначення часу прольоту (ToF), за яким швидкість світла є величиною сталою [17].

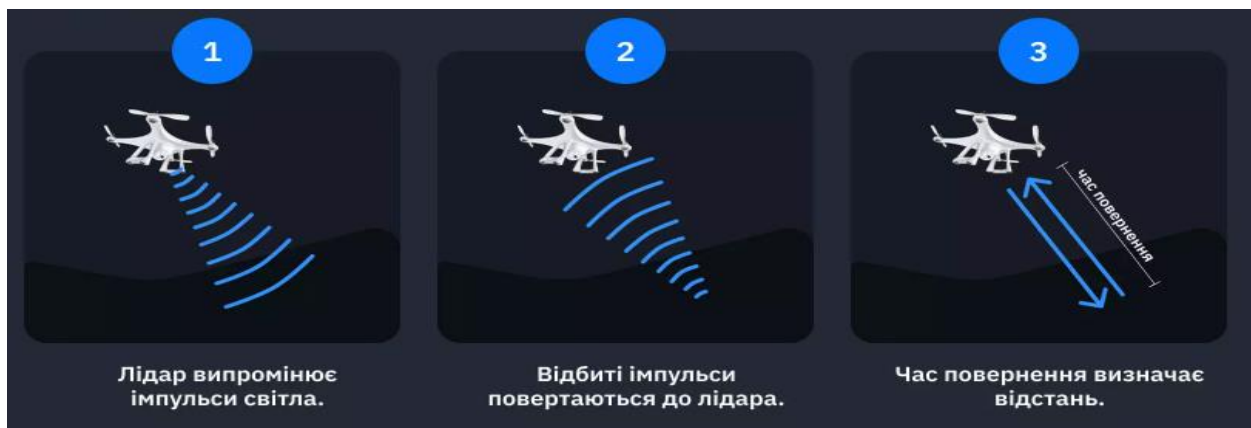


Рис. 1.1. Принцип роботи LiDAR сканування [17]

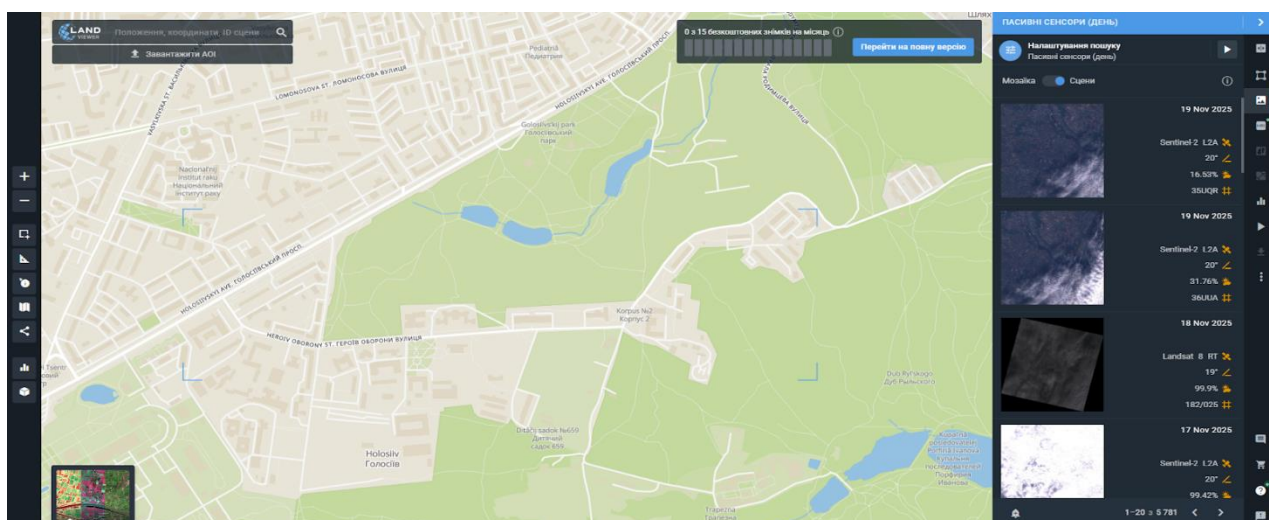


Рис. 1.2. Обробка даних LiDAR сканування [17]

Трьома основними компонентами системи виявлення та визначення дальності світла є лазер, сканер та детектор. Лазерне джерело генерує світло у вигляді переривчастих імпульсів, що дає змогу швидко просканувати область зондування в кількох напрямках. Після того як світло проходить шлях від системи до об'єкта і назад, воно реєструється сканером (зазвичай це дзеркало, що обертається або MEMS – мікроелектромеханічна система) і направляється на детектор для подальших розрахунків. Як повітряні (безпілотні) лідарні пристрої, так і лідари з георадаром (GPR) здатні проходити через ґрунт.

Звісно, в лісовій галузі ця система більш складна й багатофункціональна. Сканер навішується на літаючий об'єкт і «бомбардує» сигналом землю. Сигнал відображається від об'єктів і повертається на сканер.

Залежно від того, з якої відстані він повернувся, система робить висновок про висоту та густоту перешкод, тобто насаджень [13].

На виході ми отримуємо не просто 3D-карту деревостану, а повну інформацію про нього: кількість дерев та їхні породи, висоту та діаметр стовбурів, запас деревини в розрізі порід, вік дерев, а також цифровий ландшафт місцевості. Похибка в цьому випадку складає не більше ніж 1,5%. І це дуже якісно. Для порівняння: якщо лісівник веде підрахунок дерев окомірним способом, похибка складає 15-20%. Причина затримки із системою LiDAR зрозуміла – війна. Над нашими лісами літають «Шахеди», а не 3D-сканери. Але ми готові. І як тільки безпекові вимоги дозволять, почнемо промислове сканування наших лісів. Також на стадії розробки платформи GPS-трекінг лісовозів. На даний момент розроблено технічні вимоги системи та необхідної бізнес-аналітики. Наша мета – охопити 100% лісовозного парку.

І це не просто про рух точок на карті! Система матиме кілька рівнів валідації, мета яких – унеможливити зловживання з перевезенням деревини. Це нововведення дозволить нам взяти під контроль всі операції з логістики, пов'язані з деревиною.

Ми будемо бачити в реальному часі статус кожної машини. Перш за все ми перевірятимемо підставу для руху лісовоза: чи має він право взагалі їхати в ліс? Система бачитиме прив'язку конкретного автомобіля до конкретного номера електронного лісорубного квитка з координатами ділянки, на якій потрібно завантажити деревину, та ім'ям водія. Якщо, скажімо, за документами ділянка розташована в Чернігівській області, а транспортний засіб чомусь їде по Черкаській – в системі ми отримаємо відповідне повідомлення [13].

Radio detection and ranging (радар) – це метод виявлення, який використовує радіохвилі для визначення дальності, кута або швидкості руху об'єктів. В основі зондування Radar лежить принцип активної передачі електромагнітних хвиль у радіочастотному спектрі, виявлення хвиль, що

відбиваються від цілей (відлуння), та визначення часу проходження радіосигналів та їхнього відбиття у зворотному напрямку.



Рис. 1.3. Принцип роботи RADAR сканування [17]

Три основні елементи системи радіовиявлення та визначення координат – це передавач, антена та приймач. Антена приймає радіохвилі від передавача і транслює їх у навколишній простір. Коли ці хвилі наштовхуються на об’єкт, вони відбиваються від нього і повертаються в систему, де антена вловлює їх та передає на приймач. Приймач може визначити дальність, швидкість і розмір об’єкта, декодуючи прийняті радіохвилі. Коротшими є світлові хвилі LiDAR, які зазвичай знаходяться в діапазоні від 700 до 1550 нанометрів. Радіохвилі Radar мають довжину від 0,3 до 100 см [17].

Основною перевагою зондування LiDAR відносно Radar є висока роздільна здатність і точність даних. Як порівняти з LiDAR, Radar має всепогодний режим роботи та його простіше використовувати для моніторингу великих площ. Крім того, Radar виграє в ціні, і тому технологія LiDAR використовується рідше. Вибір лідарної або радарної технології для подальшого просторового аналізу ГІС-даних залежить від конкретних завдань зондування, обмежень застосування та наявних ресурсів.

Ефективність приладів Radar та LiDAR залежить від їхньої точності й роздільної здатності. Оскільки світло, що використовується, має меншу довжину хвилі, LiDAR дає змогу виявляти й картувати дрібніші об’єкти.

Радіолокаційні системи Radar, відповідно, збирають дані на набагато довших хвилях, що пояснює дещо меншу роздільну здатність.

Точність вимірювання відстані LiDAR та Radar також значно відрізняється. Чи є LiDAR точнішим за радарний пристрій? Враховуючи швидкість світла та точність обчислень то, лідарні датчики можуть правильно визначати відстані з точністю до декількох сантиметрів. Системи Radar можуть забезпечувати точні зчитування відстані, але під час роботи з надто малими об'єктами або в перевантаженому середовищі ці дані іноді бувають некоректними. За таких умов використання лідарних систем приносить найбільш успішні результати.

Утім, технології Radar & LiDAR постійно конкурують між собою щодо точності вимірювань. Точність зондування сучасними радіохвильовими системами суттєво підвищилася, завдяки розвитку технологій, які дають змогу працювати в ширшому діапазоні частот і використовувати складні методи обробки сигналів. Ба більше, у міру зростання пропускну здатності сучасних приймачів Radar, отримані радіолокаційні зображення стають дедалі точнішими.

Порівнюючи переваги та недоліки систем LiDAR та Radar, необхідно враховувати їхню дальність та зону дії. Насамперед дальність дії системи визначається енергією світлового імпульсу, чутливістю детектора та умовами навколишнього середовища. Дальність дії пристроїв LiDAR, встановлених на дронах або супутниках, в ідеальних умовах становить кілька кілометрів. Проте, під час погіршення погодних умов дальність дії та зона охоплення систем світлового виявлення та далекометрії може суттєво знизитися [17].

Дальність дії систем Radar – це найдовша відстань, на якій певна система може виявити об'єкт. На відміну від лідара, радарне обладнання має широкий радіус дії та зону охоплення у будь-яку пору року. Великі радіохвильові системи зазвичай мають радіус дії в кілька сотень кілометрів, що дає змогу здійснювати ефективний контроль за великими територіями.

На те, наскільки далеко й широко може «бачити» радар, впливає безліч факторів. До них відносять потужність передавача, використовувані електромагнітні хвилі, розмір та поле зору антени, висоту розташування системи та погодні умови. Аби вибрати оптимальну систему радіолокації, необхідно знайти золоту середину між цими чинниками.

Недоліком лідарних приладів, на відміну від радарів, є висока чутливість до атмосферних перешкод. Дощ, сніг та туман можуть знижувати ефективність лазерної системи, розсіюючи, поглинаючи або відбиваючи її промені. Наприклад, густий туман може послабити лазерне випромінювання на 200 дБ/км, що значно знижує ефективну дальність та точність роботи лідара.

У зв'язку з цим, вчені розробили спеціальні стратегії підвищення ефективності роботи систем на основі світлових хвиль в умовах туману. Одним з варіантів є використання лазерного випромінювання з більшою довжиною хвилі, оскільки воно менш схильне до розсіювання або поглинання частинками в повітрі. Оснащення світлових систем сучасними технологіями обробки та фільтрації сигналу також дає змогу мінімізувати вплив атмосферних шумів та перешкод.

У погану погоду за замовчуванням надійніше використовувати Radar, а не LiDAR. Завдяки більшій довжині радіохвиль, дощ, сніг та туман мають менший вплив на радіохвилі, ніж на світло. Це означає, що системи Radar можуть нормально працювати навіть у сувору погоду, що забезпечує більш надійний та точний збір даних. Ця властивість особливо актуальна, якщо радарні дані забезпечують роботу програм з безперервним режимом функціонування, наприклад, з управління повітряним рухом та моніторингу погоди.

Порівняння систем Radar та LiDAR демонструє, що лазерні системи, як правило, є складнішими та більш вартісними. Необхідність використання високоточних лазерів та датчиків, а також передових обчислювальних потужностей виправдовує вищу вартість приладів LiDAR. При цьому слід

враховувати й витрати, пов'язані з управлінням та інтерпретацією величезних масивів даних високої роздільної здатності, які збираються системами на основі світлових хвиль.

І навпаки, компоненти, що входять до складу радіолокаційної системи, коштують дешевше, ніж високоточні компоненти лідара. Радіохвильові системи часто мають нижчу вартість експлуатації та обслуговування порівняно з лазерними аналогами. Крім того, радіолокаційні системи здобувають дані з меншою роздільною здатністю, що призводить до зниження витрат на адміністрування та обробку даних. Саме менша вартість та простота в експлуатації стали основними причинами значної популярності радіохвильових систем [17].

Для виявлення об'єктів та картографування технології Radar та LiDAR є основними видами дистанційного зондування. Технологія LiDAR застосовується для точного картографування. До переваг технології Radar відносять точність виявлення об'єктів, що рухаються. Світлові технології LiDAR використовують в картографії, геодезії, відновлюваній енергетиці, робототехніці. Радіолокаційні системи Radar застосовують в авіа навігації, управлінні рухом транспорту, спостереженні за метеорологічними явищами та прогнозуванні погоди, екологічному моніторингу тощо.

Системи LiDAR та Radar також використовують з метою захисту довкілля та вивчення екологічних питань. Радіолокаційні системи застосовують для моніторингу погоди, відстеження переміщення диких тварин та вивчення характеристик поверхні Землі, таких як вміст вологи. Своєю чергою, системи світлового виявлення та далекометрії дають змогу кількісно визначати вміст шкідливих речовин у повітрі, складати карти рослинного покриву та знаходити вогнища загоряння з метою запобігання лісовим пожежам. Дані, отримані за допомогою приладів Radar та LiDAR, є важливими для вивчення зміни клімату, охорони навколишнього середовища та реагування на надзвичайні ситуації. [17]

Вибір радарної чи лідарної технології залежить від конкретної ситуації та цілей дослідження. Автономні автомобілі та точне картографування – це лише два приклади застосування, які можуть значно виграти від 3D-зображень високої роздільної здатності, зібраних за допомогою датчиків лідара. Технологія радіовиявлення та далекометрії (Radar), своєю чергою, приносить особливу користь у тих випадках, коли необхідно забезпечити дальнє зондування та надійність у будь-яку погоду, наприклад, під час керування дорожнім рухом або в метеорології. Обираючи технології Radar або LiDAR для дистанційного зондування необхідно враховувати їхню вартість, зону охоплення, точність та обмеження щодо застосування [17].

Принцип: Використання супутникових та аерозйомки для отримання геопросторових даних про лісові ресурси.

Застосування: БПЛА, оснащені мультиспектральними та тепловізійними камерами, створюють детальні 3D-моделі лісів, що дозволяє точно оцінювати запаси деревини та моніторити стан насаджень. Супутникові знімки допомагають відстежувати зміни лісового покриву на глобальному рівні та виявляти місця незаконних рубок. Систематичний огляд «Systematic Literature Review of Forest Mapping Technologies: Trends and Future Directions» [39] підтверджує, що ці технології відіграють ключову роль у моніторингу та управлінні лісовими екосистемами. За зйомки БПЛА з оптичними сенсорами можна досить оперативно отримувати зображення з високим просторовим розрізненням. Застосування таких апаратів багатоцільове, тоді як експлуатаційні витрати нижчі порівняно з супутниками, літаками або використанням LiDAR. Це дозволяє розглядати безпілотники, обладнані RGB сенсорами, як альтернативу традиційним платформам збору даних дистанційного зондування Землі для їхнього застосування в лісовому господарстві [18].

Удосконалення алгоритмів оцінювання характеристик рельєфу та триангуляції за допомогою оптичних зображень, що об'єднуються в стереопари, стимулювало розвиток стереофотограмметрії та широке її

впровадження в різні сфери природокористування [40]. Цифрова аерофотограмметрія (англ. digital aerial photogrammetry – DAP) вважається відносно новою технологією, основний принцип якої полягає у формуванні хмари точок, подібної до тієї, що отримується під час лазерного сканування [41]. Цифрова фотограмметрія розвивалася із появою доступних цифрових технологій та обчислювальних машин у поєднанні з недорогими цифровими фотоапаратами, які можна використовувати для досліджень Земної поверхні з високим розрізненням [42].

Початок 80-х років XX століття характеризується починком застосування на практиці підходу «структури від руху» (англ. *structure-from-motion* – SfM), де вперше було застосовано комп'ютерний зір для реконструкції позицій зображень, що перекривають одне одного у просторі [42]. Як окремий метод, SfM бере свій початок із 90-х років минулого століття з розробкою та впровадженням перших готових алгоритмів реконструкції 3D сцен [40]. Основний принцип роботи SfM такий же, як у стереоскопічній фотограмметрії, що використовується в лісовому господарстві. Тобто, відображення тривимірної структури географічних ландшафтів чи лісових масивів відбувається завдяки застосуванню перекриваючих одне одного зображень. Основна відмінність у застосуванні SfM полягає у повній автоматизація процесів відбудови геометрії місцевості. Таким чином, положення пар зображень та розрахунок тривимірних характеристик відбувається з мінімальним людським втручанням і виконується автоматично з використанням набору відповідних процедур, що мають ітераційний характер. Однак, для досягнення кращих результатів збільшуються вимоги до ступеня перекриття зображень [40]. Основні відмінності технологій SfM з LiDAR полягають у відсутності активного датчика та фіксуванні тільки тих променів, які відбиваються з поверхні елементів без проникаючої здатності під намет насадження. [18]

Окремі зображення з БПЛА раніше також використовувались для оцінювання дерев за рахунок аналізу їх текстури. Розвиток обчислювальних

технологій і перехід стереограмметричної науки в цифровий формат витіснив ці методи та знизив їхню актуальність, а оцінювання деяких таксаційних показників дерев переніс на рівень аналізу тривимірної хмари точок [43].

За проведеними дослідженнями [44] ефективності й вартості застосування БПЛА, одночасно порівнюючи їх з даними, зібраними за допомогою супутникової зйомки та літака, дійшли висновку, що для однорідних ділянок вони однаково ефективні. Для ділянок із більшою неоднорідністю дані з низьким розрізненням не дають змоги відобразити мінливості показників у середині таких ділянок. На основі порівняння економічних витрат доведено [44] що застосування зйомки з БПЛА на невеликих територіях до п'яти гектарів є дешевшим, якщо порівняти з іншими системами, одночасно перевершуючи їхні можливості в просторовому розрізненні. На ділянках до 50 га згадані системи також можуть бути досить конкурентоспроможними [18].

БПЛА з тепловізійними камерами можуть виявляти осередки загоряння на ранній стадії, ще до появи диму, що значно підвищує ефективність боротьби з вогнем. Дрони можуть вести моніторинг ситуації в режимі реального часу, надаючи координаційним центрам дані про площу поширення вогню, напрямок руху та допомагати в управлінні гасінням.

Мультиспектральні камери: Ці сенсори, встановлені на БПЛА, фіксують відбиття світла у різних спектрах. На основі цих даних можна визначити індекси вегетації (наприклад, NDVI), які свідчать про стан здоров'я рослин. Здорова рослинність має інший спектральний "підпис", ніж хвора чи вражена шкідниками. Це дозволяє оперативно виявляти уражені ділянки та вживати заходів.

Регулярне дистанційне зондування дозволяє виявляти незаконні вирубки, оскільки на знімках чітко видно місця, де відбулося видалення дерев. Це допомагає правоохоронним органам оперативно реагувати на порушення.

Регулювати незаконне вирубування лісів можна виконувати за допомогою лісорубних квитків. Видача лісорубного квитка здійснюється за

заявою постійного лісокористувача або власника лісів на отримання адміністративної послуги.

Лісорубний квиток є основним документом, на підставі якого:

- здійснюється заготівля деревини;
- ведеться облік дозволених до відпуску запасів деревини;
- встановлюються строки здійснення заготівлі деревини та її вивезення, строки і способи очищення лісосік від порубкових решток, а також облік природного поновлення лісу, що підлягає збереженню;
- видається сертифікат про походження лісоматеріалів та виготовлених з них пиломатеріалів «Сертифікат походження лісоматеріалів»;
- ведеться облік плати, нарахованої за використання лісових ресурсів.

Що змінюється при переході на електронний лісорубний квиток:

Будуть усунені корупційні ризики, які існували під час дії паперового лісорубного квитка [14];

Електронний лісорубний квиток дозволяє зберігати точну інформацію про рубки в лісах. Це забезпечить контроль за лісокористуванням та запобігає незаконним рубкам;

Електронний лісорубний квиток можна отримати швидко та зручно, без потреби відвідувати Міжрегіональні управління лісового та мисливського господарства і ЦНАПи [14].

Отриманий лісокористувачем електронний лісорубний квиток (рис. 1.1) автоматично вноситься на карту сайту ДП «ЛПАЦ» «lk.ukrforest.com» та в систему електронного обліку деревини (ЕОД).



Спеціальний дозвіл на спеціальне використання лісових ресурсів (лісорубний квиток)
№20250819-000151

Адміністративно-територіальна одиниця місцезнаходження/місце проживання (перебування) постійного лісокористувача (відокремленого підрозділу)/власника лісів
Київська область

Постійний лісокористувач (відокремлений підрозділ)/власник лісів
ДП "Ліси України" (Філія "Столичний лісовий офіс" Державного спеціалізованого господарського підприємства "Ліси України")

Найменування лісництва (структурного підрозділу)
Городницьке (ДП "Городницьке ЛГ") Звягельське надлісництво

Система рубок
РФіОЛ - санітарні

Вид, спосіб рубки
Вибіркова санітарна рубка

Спосіб обліку
за кількістю дерев, що призначені в рубку (подеревно)

Рис. 1.4. Зразок електронного лісорубного квитка

Одним із прикладів цифрової трансформації є діджиталізація лісокористування, яка дає змогу проводити інвентаризацію лісогосподарських угідь, правильно й своєчасно відображувати в обліку та здійснювати контроль за ними. Так, останні роки Україна не стоїть осторонь від світових тенденції діджиталізації суспільних відносин, незважаючи на військову агресію російської федерації на території країни, вплив наслідків пандемії, що досі відчувається в економіці, економічну, політичну та екологічну нестабільність. Війна у державі вносить суттєві корективи до роботи лісової галузі, зокрема щодо здійснення належного використання та охорони лісів. Охорона лісів є одним із пріоритетних напрямів лісової галузі, адже в умовах воєнного часу гостро стоять питання необхідності використання деревини для оборонних цілей держави, промисловості та потреб суспільства. Окрім того, ліси виконують важливі екологічні функції і мають значний вплив на інші екосистеми, тому належна правова охорона і

захист забезпечить стабільний стан навколишнього природного середовища і успішний розвиток економіки держави [9, с. 167].

Світовий досвід цифрової трансформації лісового господарства переконливо показує, що країни-лідери, зокрема Фінляндія та Швеція, сформували сучасну модель управління лісами, яку часто називають «Ліс 4.0». Її сутність полягає в поєднанні високоточної аналітики, автоматизації та цифрових платформ, які забезпечують повний контроль над ресурсами – від збирання інформації про стан насаджень до відстеження руху деревини в реальному часі.

У Фінляндії цифровізація охоплює весь цикл лісокористування. Ліси країни повністю оцифровані: дані про кожне дерево, його вік, темпи росту, санітарний стан і потенційну цінність зберігаються в єдиній національній системі. Дистанційний моніторинг використовує супутникові знімки високої роздільності, лазерне сканування та безпілотники, що дозволяє отримувати вичерпну картину стану насаджень без необхідності постійних польових оглядів. На основі цих даних алгоритми прогнозують обсяги вирубок, оцінюють ризики пожеж, шкідників і кліматичних змін, а також допомагають планувати лісовідновлення максимально ефективно.

Швеція демонструє аналогічно високий рівень цифрового управління, роблячи особливий акцент на автоматизації ланцюга постачання. Завдяки цифровим біркам, GPS-маркуванню та спеціальним платформам дерево супроводжується даними від моменту його зрізування до прибуття на деревообробне підприємство. Це практично повністю усуває тіньові схеми, підвищує довіру на ринку та дає змогу точно контролювати обіг деревини. Крім того, шведські лісові компанії активно використовують штучний інтелект для моделювання майбутніх станів лісів, оптимізації маршрутів техніки та прогнозування економічної віддачі від різних методів господарювання.

Загалом практика цих країн демонструє, що цифрові технології стають основою стійкого розвитку лісового сектору. Вони дозволяють значно зменшити витрати, підвищити прозорість, забезпечити швидке реагування на загрози та формувати науково обґрунтовану політику управління лісами. Саме такий підхід все частіше вважається найперспективнішим стандартом майбутнього для галузі в усьому світі. Широко використовуються дані, отримані за допомогою лазерного сканування з повітря (LiDAR) та супутникових знімків для точної інвентаризації лісових ресурсів. Це дозволяє отримувати детальну інформацію про висоту, щільність та об'єм дерев без необхідності ручних вимірів [45].

Лісозаготівельна техніка, така як харвестери та форвардери, оснащена GPS-навігацією та сенсорами, що в реальному часі передають дані про об'єм, розміри та якість заготовленої деревини. Це дозволяє оптимізувати логістику та мінімізувати втрати.

Розроблено єдині цифрові платформи, які інтегрують дані від лісовласників, лісозаготівельних компаній, переробних підприємств та органів управління. Це забезпечує простежуваність деревини від "кореня" до "кінцевого продукту", що є важливим для сертифікації та боротьби з незаконними рубками.

Канада: Боротьба з лісовими пожежами та відновлення лісів

Канада, як і інші країни з великими лісовими масивами, активно використовує цифрові інструменти для моніторингу та управління ризиками.

Моніторинг за допомогою дронів та супутників: Дрони та супутникові знімки високої роздільної здатності використовуються для оперативного виявлення осередків лісових пожеж та оцінки масштабів пошкоджень після них. Це дозволяє ефективно планувати операції з гасіння та лісовідновлення.

Цифрові платформи для відновлення: Компанії, такі як Wilder Climate Solutions та Accenture, розробили додатки, що допомагають вирішити проблему нестачі насіння дерев для відновлення лісів після пожеж. Застосунок "Squirrel" дозволяє поєднати збирачів насіння з організаціями, які займаються

лісовідновленням, що сприяє ефективній логістиці та забезпеченню необхідним посадковим матеріалом [46].

Німеччина та Австрія: Управління здоров'ям лісів та моніторинг шкідників

У Центральній Європі цифрові технології допомагають підтримувати здоров'я лісових екосистем.

Мобільні додатки для збору даних: Лісівники та науковці використовують мобільні додатки для внесення інформації про стан дерев, наявність шкідників або ознак хвороб безпосередньо в полі. Ці дані миттєво передаються в центральну базу, що дозволяє швидко реагувати на загрози [47].

Інтеграція даних: Інформація з польових обстежень, супутникових знімків та метеорологічних станцій інтегрується в єдину систему, що дозволяє створювати моделі ризиків та прогнозувати поширення хвороб та шкідників (наприклад, короїда).

США: Застосування технологій у лісовій інвентаризації та сертифікації

ГІС-технології: Геоінформаційні системи є основою для управління лісовими ресурсами в США. Вони використовуються для створення електронних карт, планування рубок, моніторингу біорізноманіття та управління об'єктами.

Блокчейн-технології: Деякі компанії досліджують використання блокчейну для забезпечення простежуваності деревини від лісу до споживача. Це надає прозорість щодо походження продукції, що особливо важливо для екологічно відповідальних ринків.

1.2. Огляд існуючих цифрових інструментів для збору даних

Цифрові каліпери (Digital Calipers)

Цифровий каліпер - це інструмент для вимірювання діаметра дерева. У лісовому господарстві каліпер діаметр на висоті грудей (DBH) дерева, яке росте в будь-якому ландшафті. Вимірювання зазвичай проводиться на висоті

1,4 м над ґрунтом [9]. Вимірювання штангенциркулем (каліпером) на розсадних деревах описує розмір рослинного матеріалу, що продається. Вимірювання штангенциркулем для розсадних дерев розміром чотири дюйми (10 см) або менше здійснюється на висоті шість дюймів (15 см) над ґрунтом. Як тільки штангенциркуль дерева перевищує чотири дюйми (10 см), дерево вимірюється на висоті дванадцять дюймів (12 см) над ґрунтом [9].

Технічні характеристики та можливості: сучасні цифрові каліпери забезпечують високоточні вимірювання діаметру дерев на висоті грудей (DBH – Diameter at Breast Height) з точністю до 0.1 мм.

Основні переваги:

- 1) Цифровий дисплей з чіткими показниками діаметру
- 2) Швидкі та точні вимірювання без ручних розрахунків
- 3) Інтеграція з польовими комп'ютерами через бездротове з'єднання
- 4) Автоматичне збереження даних в цифровому форматі

Цифровий електронний каліпер для лісівників використовується для вимірювання діаметру на висоті грудей і підключає каліпер бездротово до планшетного польового комп'ютера, що працює з системою Field-Map.

Точність та ефективність: цифрові каліпери забезпечують швидкі та точні вимірювання, роблячи їх ідеальними для застосувань, що вимагають високої точності. Практичне застосування: інвентаризація лісових насаджень, моніторинг росту дерев, наукові дослідження лісових екосистем, оцінка об'ємів деревини.

Електронні дендрометри (Electronic Dendrometers)

Класифікація та типи:

- 1) Контактні дендрометри:

Мануальні стрічкові дендрометри використовують принцип двох концентричних трубок для вимірювання змін обхвату дерева. Цифрові каліперні дендрометри забезпечують 10-кратне підвищення роздільної здатності

- 2) Безконтактні дендрометри:

Безконтактний дендрометер Criterion RD 1000 Electronic BAFscope-Dendrometer містить інтегрований датчик нахилу, що дозволяє збирати дані про діаметр у будь-якій точці стовбура та визначає висоту, на якій досягається певний діаметр [11]. Принципи роботи: стрічкові дендрометри - принцип роботи базується на використанні двох концентричних трубок для вимірювання змін обхвату з постійним натягом стрічки.

Електронні системи: електронний дендрометр дає цифрову індикацію діаметру в будь-якій точці дерева. По суті, це електронний реласкоп. Переваги сучасних електронних дендрометрів: високоточні вимірювання з автоматичним записом, можливість довготривалого моніторингу росту дерев, інтеграція з системами збору даних, компенсація температурних впливів.

Застосування в дослідженнях: для досвідчених користувачів дендрометр також може використовуватися з цифровим каліпером для досягнення десятикратного збільшення роздільної здатності порівняно з візуальним зчитуванням [12].

Серед перспективних інструментів із точки зору цифровізації лісового сектору особливе місце посідають «Мартелоскопи» методика закладання навчально-дослідних ділянок (площею 0,4-1,0 га), яка передбачає маркування всіх дерев на ділянці, картування їх, та визначення таксаційних показників кожного дерева. Методика передбачає створення цифрової карти, на якій кожне дерево має свої координати та детальний опис таксаційних показників, зокрема висоту, діаметр, породу, стан та інші характеристики. Такий підхід дозволяє поєднати польові спостереження з цифровими інструментами аналізу й візуалізації лісових насаджень. Безпосередньо термін «мартелоскоп» (marteloscope) має франко-грецьке походження та утворений поєднанням французького «martelage» (маркування дерев у лісі) та грецького «skopein» (спостерігати, оглядати). Назва дослівно відображає суть методу – «спостереження за відбором дерев».

Ідея «Мартелоскопів» з'явилася у 1992 році під час зустрічі групи *Pro Silva France* (європейська мережа лісівників, яка об'єднує фахівців, що

практикують та просувають наближене до природи лісівництво). Широке поширення використання мартелоскопів для професійної підготовки фахівців лісового господарства отримало у 1990-х роках у державних та приватних лісах Франції.

Класичний розмір ділянки становить 100×100 метрів, тобто має площу 1 гектар. Такі ділянки закладають у репрезентативних типах лісу, щоб вони максимально відображали властивості певного насадження. Вибір місця закладання «Мартелоскопів» визначається цільовим метою тренувань – від підвищення продуктивності до забезпечення збереження біорізноманіття або формування мішаних лісів. Основна мета «Мартелоскопів» полягає у створенні можливості моделювання різних варіантів лісівничих втручань – рубок догляду, рубок головного користування, переформування насаджень тощо. Завдяки повним даним про кожне дерево учасники навчань можуть проводити віртуальні або практичні вправи з відбору дерев для рубки, оцінювати наслідки своїх рішень для структури насадження, продуктивності та екологічного стану лісу. Таким чином, «Мартелоскоп» є важливим інструментом для підготовки лісівників і студентів, що дозволяє розвивати практичні навички прийняття рішень у реальних умовах, але без шкоди для лісу. Він поєднує традиційні методи лісівництва з сучасними цифровими технологіями, сприяючи сталому веденню лісового господарства та підвищенню професійного рівня фахівців.

Успішне використання даних про ліси та покращення практик лісогосподарювання залежить від програмного забезпечення, яке має забезпечувати послідовний та зрозумілий процес роботи з даними. Одна із платформ, яка дозволяє інтегрувати польові та цифрові дані для подальшого використання у навчальних та дослідницьких цілях є *martelage.sylvotheque.ch* (<https://martelage.sylvotheque.ch/>), яку розробили в Бернському університеті прикладних наук, школі сільськогосподарських, лісових та харчових наук, і яка містить мережу з понад 200 мартелоскопів у різних європейських країнах [3, 4]. Платформа надає низку функцій, включаючи вибір дерев для

вирубування, аналіз даних, завантаження даних та візуалізацію лісів за допомогою панорамних зображень 360°.

У співпраці Національного університету біоресурсів і природокористування України з Бернським університетом прикладних наук, в Україні було закладено та розміщено на платформі 11 ділянок, з яких 7 у лісах ВП НУБіП України «Боярска ЛДС». Мережа пробних площ має в подальшому стати базою на якій можна проводити навчання та тренування, а також моніторинг.

Закладання навчально-дослідних ділянок за методикою «Мартелоскопа» здійснюється з врахуванням ряду чинників, а саме розташування ділянки, тип насадження, площа ділянки та кінцева мета закладання мартелоскопу. На ділянці проводиться маркування дерев, мапування, вимірювання висот та діаметрів, а також визначається загальна інформація про ділянку.

Окремим елементом, який дозволяє створити відображення ділянки у віртуальній реальності є панорами 360°. Під час вибору місця створення панорами потрібно враховувати мінімальну відстань до найближчого дерева, яка не повинна бути менше 3 м. Зйомка здійснюється у вигляді серії знімків, які охоплюють сферу відносно точки знімання, і мають перекриття не менше 20%. Всього, для однієї панорами 360° робиться 70-86 фото. На кожній ділянці створюється не менше 5 панорам. Далі отримані знімки опрацьовують («зшивають»), для отримання панорамного фото 360° (рис. 1) за допомогою спеціальних програм, наприклад *Image Composite Editor*, *PanoramaStudio 4 Pro*, *Adobe Photoshop*, *PTGui*.



Рис. 1.5. Процес «зшивання» фотознімків у панораму 360° (*PanoramaStudio 4 Pro*)

Інформація про просторове розташування дерев, їх біометричних характеристики разом із панорамами 360° інтегрується на платформу *martelage.sylvotheque.ch*. (рис. 2-4), що є так званою «текою» лісових ділянок, яку в подальшому використовують для навчання моніторингу та наукових досліджень.

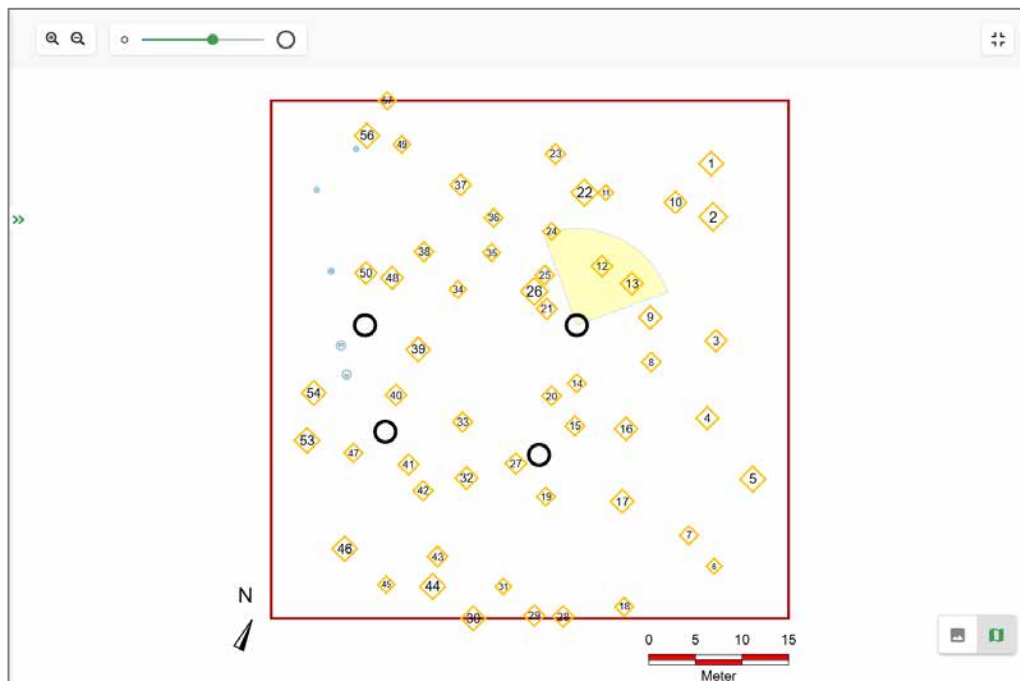


Рис. 1.6. Відображення розташування дерев та панорам 360° на цифровій карті

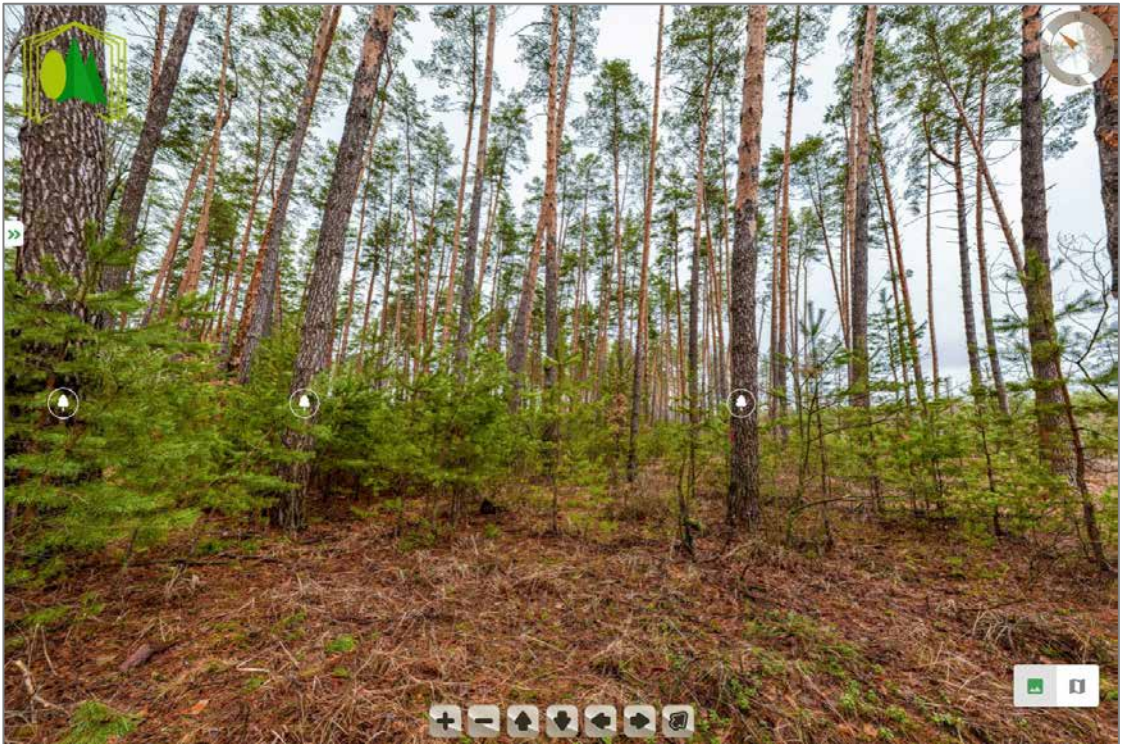


Рис. 1.7. Панорама 360° лісової ділянки на платформі *martelage.sylvotheque.ch* (URL: <https://martelage.sylvotheque.ch/tour/591>)

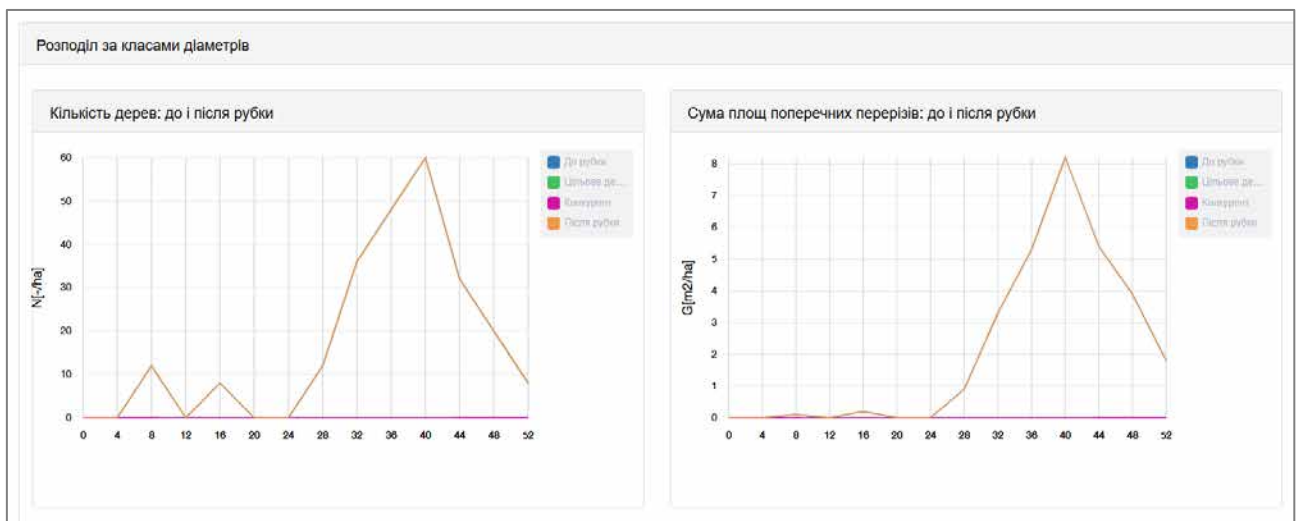


Рис. 1.8. Приклад відображення статистичної інформації про насадження

Враховуючи виклики спричинені змінами клімату та війною, соціально-екологічну напруженість в Україні та інтеграцію нашої країни в ЄС, запит на пошук нових підходів до господарювання в лісах, які дозволять пом'якшити ризики та підготувати ліси до майбутніх умов, зростає. Для дослідження та

розвитку нових підходів лісівництва в різних типах лісів, потрібні відповідні наукові дослідження, які будуть основою нормативних документів та рекомендацій. Практичне застосування GPS-технологій: GPS технології були застосовані в дослідженні Токійського університету серед лісу де було відібрано та помічено для санітарної вибіркової рубки загалом близько 1,565 дерев на площі 29.23 га в лісі Хоккайдо Токійського університету. Портативний GPS-приймач використовувався для запису координат усіх помічених дерев, та зберігав помічені дані в хмару.

Фотосфери – це панорамні зображення зроблені і відредаговані у 360°, зроблені для того щоб була можливість віддалено спостерігати за динамікою росту і розвитку певних лісових насаджень, в яких створювались фотосфери.

Для ефективного використання фотосфер у лісовому господарстві важливо мати відповідне обладнання, таке як спеціальні камери для зйомки панорамних зображень, та програмне забезпечення для обробки і аналізу даних.

Використання сучасних технологій, таких як фотосфери, значно покращує можливості управління лісовими ресурсами та сприяє сталому розвитку лісового господарства. Використання фотосфер у лісовому господарстві також може бути ефективним для створення інвентаризаційних баз даних, що містять візуальні записи про різні ділянки лісу. Це дозволяє створювати детальніші та більш точні карти, а також автоматизувати процеси аналізу даних. Фотосфери можуть використовуватися для моніторингу динаміки лісових меж, що допомагає виявляти нелегальні вирубки або природні зміни, такі як ерозія або розширення території лісу.

Також фотосфери можуть бути корисними для оцінки впливу рекреаційної діяльності на лісові екосистеми. Візуалізація шляхів та зон відпочинку дозволяє краще планувати інфраструктуру, мінімізуючи негативний вплив на природу. Крім того, фотосфери можуть використовуватися для документування та моніторингу історичних та культурних об'єктів у лісах, що сприяє їх збереженню та популяризації.

1.3. Переваги та виклики використання цифрових технологій у лісовому господарстві під час повномасштабного вторгнення в Україні

Російсько-українська війна завдає колосальних збитків лісовим екосистемам і поглиблює проблеми ведення лісового господарства, які існували до 2014 року. З початком воєнних дій значні площі лісових насаджень на Сході нашої країни зазнали негативного впливу або ж зовсім були знищені. Вже після 2022 року, з початком повномасштабного вторгнення, знищені ліси не тільки східних регіонів України, але й Півночі, Півдня та Заходу нашої країни [15].

Повномасштабна війна – це не тільки зруйновані міста, а й пошкоджені ліси. Лісники в Україні зараз працюють в умовах, де звичні методи стають небезпечними або неможливими. Саме тут на допомогу приходять цифрові технології. Повномасштабне вторгнення Росії стало безпрецедентним викликом для всіх секторів економіки України, включно з лісовим господарством. Цифрові технології, які до війни були інструментом для підвищення ефективності та прозорості, під час війни перетворилися на критично важливі засоби для збереження управління, оцінки збитків та забезпечення стабільності.

Найбільш загрозливими для лісових екосистем є пожежі, викликані вибухами снарядів та мін, масованими обстрілами, падінням підбитих літаків, підпалом сухої трави і лісових насаджень для стримання ворога. Важливим аспектом є неможливість гасіння чи контролювання пожеж під час бойових дій, що призводить до поширення вогню на дуже великі площі. Варто згадати найдовшу пожежу у Чорнобильській зоні, яка тривала майже місяць, вигорілі вщент ліси Херсонщини, Донеччини та Луганщини. Результатом лісових пожеж є загибель представників флори та фауни, руйнування лісової підстилки, забруднення ґрунтів, підземних вод, а також викид в атмосферу великої кількості двоокису вуглецю. Наслідками таких негативних процесів є втрата лісів, у більшості випадках які не підлягають відновленню [15].

Негативного впливу також зазнають природно-заповідні території, а саме від спорудження фортифікацій, проїзду важкої техніки на територіях природно-заповідного фонду, пожеж. Загрозливим для біорізноманіття є розлив паливно-мастильних матеріалів техніки, ракетного палива від розриву снарядів та ракетних установок. Великі площі природно-заповідних територій залишаються поза доступом фахівців через мінування, що, з одного боку, призводить до неможливості моніторингу процесів на цих територіях, а з іншого, – діяльність людини не заважатиме природним процесам, які там відбуваються. Території ПЗФ та території, що не мають природоохоронного статусу, на довгий час можуть залишитися заповідними. Під питанням залишається можливість створення нових природно-заповідних територій та розширення діяльності вже наявних, де не ведуться бойові дії. Ті ліси, які могли б отримати статус природоохоронних, наразі знаходяться під загрозою неконтрольованих рубок та знищення [15].

Розпочата росією війна проти України щодня ставить під загрозу екологічну безпеку тисяч людей. Це також завдає значної шкоди лісам та іншим природним ландшафтам, перешкоджає веденню лісогосподарської діяльності в країні. Загалом із 24 лютого 2022 року від воєнних дій майже 30% лісів зазнало різного ступеню шкоди. Незважаючи на це, у світі за останні десятиріччя збільшились обсяги міжнародної торгівлі продуктами деревообробної промисловості, що можна пояснити екологічністю, універсальністю та енергоємністю матеріалів з деревини. Світовим трендом виступає активне впровадження інноваційних технологій в лісовій промисловості на рівні організації підприємства, виробництва та збуту [16].

Переваги цифрових технологій як інструментів виживання та адаптації

Дистанційний моніторинг пошкоджень: У районах, де ведуться бойові дії або які тимчасово окуповані, доступ до лісових масивів є неможливим і небезпечним. Дистанційне зондування (супутникові знімки та аерозйомка) стало єдиним способом оцінки масштабів руйнувань, спричинених обстрілами, пожежами та мінуванням. За даними Державного агентства

лісових ресурсів України, цифрові інструменти дозволяють виявляти осередки загорянь та фіксувати площі, уражені вогнем, що критично важливо для подальшого планування відновлювальних робіт.

Забезпечення прозорості та боротьба з незаконними рубками: В умовах загального хаосу та відсутності фізичного контролю, ризик незаконних рубок значно зростає. Цифрові системи, такі як "Ліс у смартфоні" (яка інтегрує електронний облік деревини), дозволяють громадянам перевіряти законність лісорубних квитків та походження деревини, що допомагає запобігти тіньовим операціям та контролювати ланцюг постачання. Ця технологія стала ключовим елементом громадського контролю.

Збереження даних та управління в умовах евакуації: Багато лісгоспів, особливо на Сході та Півдні України, були змушені евакуювати персонал та документацію. Переведення даних у цифрові формати та їх зберігання у хмарних сховищах забезпечило безперервність роботи, навіть коли фізичні офіси були зруйновані. Це дозволило зберегти критично важливу інформацію про лісовий фонд, карти та фінансові документи.

Ефективне управління логістикою: Цифрові платформи допомагають оптимізувати маршрути транспортування деревини з менш постраждалих регіонів, уникаючи небезпечних зон та пошкоджених шляхів. Це допомагає підтримувати економічну діяльність і забезпечувати сировиною вітчизняні підприємства.

Оперативне інформування та комунікація: Цифрові канали зв'язку дозволяють оперативно обмінюватися інформацією між центральним офісом Держагентства лісових ресурсів та регіональними підприємствами, що є життєво необхідним для швидкого прийняття рішень у надзвичайних ситуаціях.

Виклики пов'язані з війною: недоступність територій і небезпека для працівників. Найсерйознішою проблемою є неможливість потрапити до лісових масивів, що розташовані в зоні активних бойових дій. Навіть за наявності супутникових матеріалів, для їх підтвердження та детального

аналізу необхідна фізична присутність спеціалістів. Використання безпілотників також пов'язане з високим ризиком, оскільки їх можуть збивати або сприймати як військові цілі.

Перебої з електропостачанням і зв'язком. Обстріли об'єктів критичної інфраструктури спричиняють відключення електрики та Інтернету, що фактично блокує роботу цифрових рішень. Під час блекаутів доступ до хмарних платформ і баз даних стає недоступним, унаслідок чого діяльність підприємств зупиняється. Українська цифрова інфраструктура постійно зазнає кібератак. Лісогосподарські інформаційні системи, які містять важливі відомості, також перебувають під високим ризиком. Пошкодження, видалення або викрадення даних може мати вкрай негативні наслідки для управління природними ресурсами. Брак фінансів та матеріальних ресурсів. Через війну значні державні й приватні кошти спрямовуються на оборону. Це спричиняє скорочення фінансування цифрових проєктів, оновлення технічної бази (дронів, датчиків) і навчання фахівців.

Мінування лісових територій. Навіть після звільнення деяких регіонів великі площі лісів залишаються замінованими. Це унеможлиблює проведення польових досліджень, і цифровий моніторинг залишається єдиним способом спостереження за ситуацією, хоча він не здатен повністю замінити фізичні огляди.

Попри ці масштабні труднощі, цифрові технології в Україні перетворилися не лише на інструмент підвищення ефективності, а на критично важливий засіб управління та збереження лісового фонду в умовах війни. Вони дають змогу підтримувати контроль над галуззю, забезпечувати прозорість процесів і формувати основу для подальшого відновлення.

Висновок до розділу 1. В першому розділі ми оглянули теоретичні основи, переваги та виклики впровадження цифрових технологій у лісове господарство України. Оглянули наявні цифрові технології, їхні особливості. Оглянули поточні виклики впровадження цифрових технологій у зв'язку з повномасштабним вторгненням.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЗБОРУ, ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ ДОСЛІДНОГО МАТЕРІАЛУ

2.1. Методика збору дослідних даних

Методика збору, характеристика та первинна обробка дослідного матеріалу, залежить від основної мети, функції фотосфер, супутникових знімків, даних сканування LiDAR та RADAR для чого будуть використовуватися зроблені фотосфери, знімки сканування, та супутникова зйомка. Першочергово зібраний матеріал буде використовуватися для того, щоб провести оцінку стану лісових масивів, для оцінки наявності на певних територіях лісових масивів пожеж, наявність в них хвороб і для майбутнього контролю стану насадження.

Ще одна мета використання зібраних матеріалів полягає в тому, щоб використовувати їх в навчальних цілях, для вивчення і поширення найкращих лісівничих практик. Крім того, вони можуть бути використані для віддаленого контролю лісових масивів, що дозволить певним особам, які не мають можливості особистого вивчення та контролю, активно сприяти у збереженню та управлінню лісовими насадженнями.

Завдання дослідження полягає в тому, щоб опрацювати методику створення фотосфер, супутникових знімків, місця сканування LiDAR та RADAR зробити колекцію фотосфер, супутникових знімків, знімків сканування за допомогою яких можна буде вивчати певні лісові насадження, вести контроль лісових насаджень та за потреби поширювати знання про фотосфери, щоб покращити методи навчання лісівників кращим практикам у лісовому господарстві.

2) Вибір місця та часу зйомки, визначення часу доби та погодні умови

Місце для створення фотосфер, супутникових знімків, знімків сканування можна відбирати в будь-якому лісову насадженні, але критерії для відбору дослідного матеріалу є чітко визначеними, а саме ділянка має

найкраще відображати склад насадження.

Вибираємо погодні умови таким чином, щоб не перешкоджати у створенні фотосфер, супутникових знімків, знімків сканування і не завдати шкоди обладнанню під час несприятливих умов.

3) Обладнання для зйомки:

Для того щоб робити фотосфери, супутникових знімків, знімків сканування потрібна камера з функцією панорамної зйомки або фотоапарат з «риб'ячим оком», також можна використовувати камеру звичайного мобільного телефону, яка зможе передати стан і склад насадження. Для створення супутникових знімків оптичні камери, що фіксують зображення у видимому та інфрачервоному спектрах, гіперспектральні датчики, які дозволяють точніше визначати стан рослинності, або радіолокаційні системи SAR, здатні отримувати дані навіть уночі та під хмарністю. Щоб забезпечити регулярне й точне спостереження, супутники запускають на орбіти висотою приблизно 500–800 км, де вони можуть повторювати зйомку однієї й тієї ж території з інтервалом у кілька днів. Отримана інформація передається на наземні приймальні станції, які відповідають за прийом, первинну обробку й передачу матеріалів у спеціальні дата-центри. Там дані зберігаються, коригуються та проходять калібрування: усуваються атмосферні спотворення, виконується геоприв'язка і проводиться спектральна обробка. Тільки після цього знімки стають придатними для глибокого аналізу.

Для сканування лісових територій за допомогою LiDAR і RADAR потрібна комплексна система, яка включає спеціальне обладнання, платформу для його розміщення, програмні засоби для обробки даних та фахівців, що здійснюють аналіз отриманих результатів.

LiDAR-сканування базується на використанні лазерного імпульсу, який випромінюється сенсором і повертається назад після відбиття від поверхні. Для цього потрібен лазерний сканер з високою частотою імпульсів, система GPS та інерціальна навігаційна система, що забезпечують точність просторового позиціонування, а також платформа – зазвичай безпілотник, літак

або наземний комплекс. Дані LiDAR дозволяють отримати точну модель рельєфу, структури деревостану, висоту насаджень та щільність лісу. Щоб обробити величезну кількість точок, необхідні потужні комп'ютери та спеціальні програми, які будують цифрові моделі місцевості та крони дерев [17].

RADAR-сканування працює за іншим принципом: радіохвиля випромінюється антеною і відбивається від об'єктів на землі. Для цього потрібні високочутливі радіолокаційні антени, системи стабілізації та точного орієнтування, а також носій – супутник, літак чи безпілотник. Радари мають перевагу над оптичними сенсорами, оскільки дозволяють отримувати інформацію незалежно від погоди та освітлення, навіть крізь хмари чи густу рослинність. Завдяки цьому можна визначати зміни в структурі лісу, відстежувати вирубки, оцінювати біомасу та вологість ґрунту [17].

На завершальному етапі дані LiDAR і RADAR проходять складну обробку: корекцію шумів, геоприв'язку, побудову цифрових моделей та інтерпретацію результатів. Для цього використовують GIS-системи, хмарні платформи обчислення та алгоритми машинного навчання. Усе це дозволяє отримувати максимально точну та оперативну інформацію про стан лісів, їх структуру, зміни та потенційні ризики [17].

Штатив для стабілізації камери під час зйомки.

Пульт дистанційного керування (за бажанням).

4) Процес зйомки:

Для того щоб починати процес фотозйомки потрібно встановити камеру на штатив у зручному місці, або якщо використовується телефон без штативу, то вибираємо найзручнішу точку на вибраній раніше ділянці. Після того як вибрано найзручнішу точку з якої буде проходити зйомка, потрібно зробити панорамне фото, обертаючи камеру на 360 градусів. Панорамне фото потрібно зробити спочатку на рівні очей, потім опустивши камеру трохи нижче, після чого робиться фото і так поки не дістанемося до самої землі, так робити догори поки не піднімемо камеру до верху.

Потрібно переконатись, що на фото немає сторонніх предметів, які можуть заважати аналізу та збору дослідного матеріалу. Якщо все ж таки на фото потрапив сторонній предмет, то на місці потрібно його переробити, щоб потім не виникало ніяких проблем. Важливо, після того як зроблене панорамне фото, потрібно зробити резервні копії панорамних фото.

5) Збір додаткових даних:

Після того як зроблено панорамні фото на дослідних ділянках, потрібно зробити детальний опис дослідних ділянок, на яких робились панорамні фото, потрібно описати склад, вік деревних порід і т.д.

7) Первинна обробка дослідницького матеріалу

Конвертація фото: Якщо фото зроблені у форматі RAW, їх потрібно конвертувати у формат JPEG або PNG.

Обрізка та вирівнювання: Потрібно обрізати фотографії, щоб видалити небажані елементи, і вирівняти їх, щоб горизонт був горизонтальним.

Корекція кольору та яскравості: Відрегулювати колір та яскравість фотографій, щоб покращити їх візуальну якість.

Додавання геоданих: Додати геодані до фотографій, якщо вони не були записані автоматично.

Додавання метаданих: Додати метадані до фотографій, якщо це необхідно для вашого дослідження.

8) Зберігання дослідницького матеріалу

Фотосфери та інші дані дослідження слід зберігати в безпечному місці, наприклад, на зовнішньому жорсткому диску або в хмарному сховищі.

Важливо створити резервні копії даних, щоб уникнути їх втрати.

9) Приклади неправильно виконаних фотосфер



Рис. 2.1. Приклад помилок під час створення фотосфер

На даному зображенні при обробці фотосфери допущено помилку у вигляді перебільшення або замало зроблених фотографій, у випадку коли фотографій забагато, то апаратне програмне забезпечення не розуміє що до чого правильно склеювати фотографії, так як воно орієнтується по кольорам, і не виправлено було кольорову гаму фотографій і певні фотографії були більш яскравіші, а певні фотографії були менш яскравіші, що в свою чергу призвело до такої ситуації.

2.2. Характеристика дослідного матеріалу

Супутникові знімки зазвичай зберігаються у форматах, що здатні передавати багатоканальні дані, великі просторові покриття та геоприв'язку. Найпоширеніший тип – це геопросторові растрові файли, серед яких ключовим є GeoTIFF, що дозволяє вбудовувати метадані про координати, проєкцію та характеристики сенсора. У деяких супутникових місіях використовують формати JP2 (JPEG2000) для стискання великих масивів інформації без істотної втрати якості, а також власні контейнерні формати на

кшталт SAFE, що застосовуються в місіях Sentinel для зберігання радарних і оптичних даних у комплексному вигляді.

LiDAR-сканування створює хмару точок – тривимірне представлення поверхні, яке зазвичай зберігають у форматах LAS або LAZ. Перший є стандартним відкритим форматом, який містить інформацію про кожену точку: координати, інтенсивність лазерного імпульсу, класифікацію об'єктів і додаткові атрибути. LAZ є його стислою версією, що дозволяє значно економити місце без втрати точності. Результати обробки LiDAR часто експортують у вигляді цифрових моделей рельєфу та поверхні у форматах GeoTIFF або GRID.

RADAR формуються у специфічних наукових форматах, здебільшого комплексних (complex data), які містять як амплітуду, так і фазу сигналу. Як і у супутниковій оптиці, використовуються GeoTIFF, SAFE та інші спеціалізовані контейнери, що включають метадані про орбіту, кут зйомки та параметри радарної обробки. Після інтерферометричної обробки результати, такі як карти деформацій або висотні моделі, також зберігаються у звичних растрових форматах.

Для перегляду, форматування та редагування таких даних застосовують широкий спектр програмного забезпечення. Супутникові знімки та радарні дані найчастіше обробляють у геоінформаційних системах, таких як QGIS або, у професійних інституціях, через платформи на кшталт ArcGIS Pro. Для швидкого онлайн-перегляду використовують спеціальні хмарні сервіси на кшталт Sentinel Hub EO Browser та Google Earth Engine, який дає можливість працювати з великими масивами супутникових даних без завантаження їх на локальні машини.

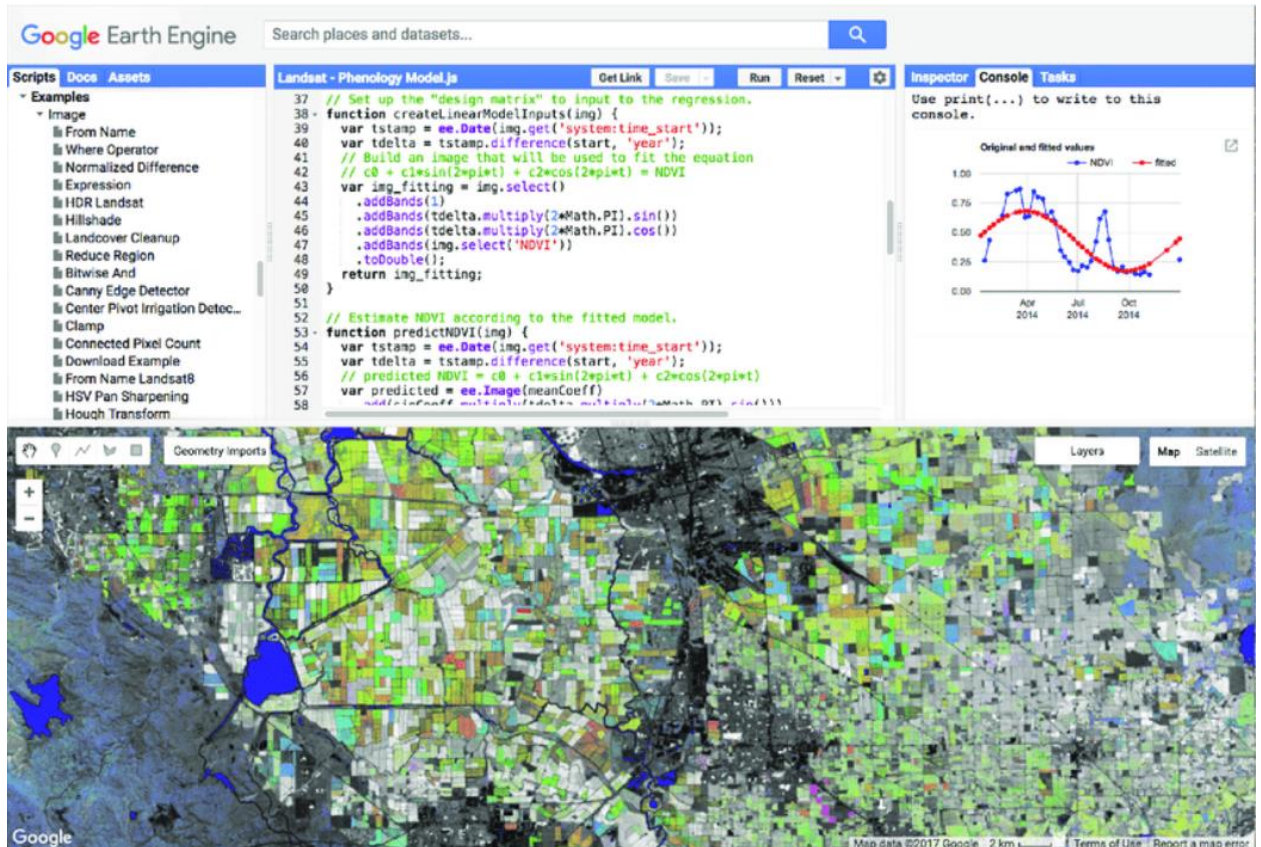


Рис. 2.2. Обробка супутникових зображень за допомогою сервісу Google Earth Engine

LiDAR-файли LAS/LAZ обробляють у спеціалізованих програмах, таких як LAStools, або інтегрують у середовище QGIS чи ArcGIS для подальшого аналізу. Для більш просунутої 3D-обробки та класифікації застосовують такі рішення, як CloudCompare.

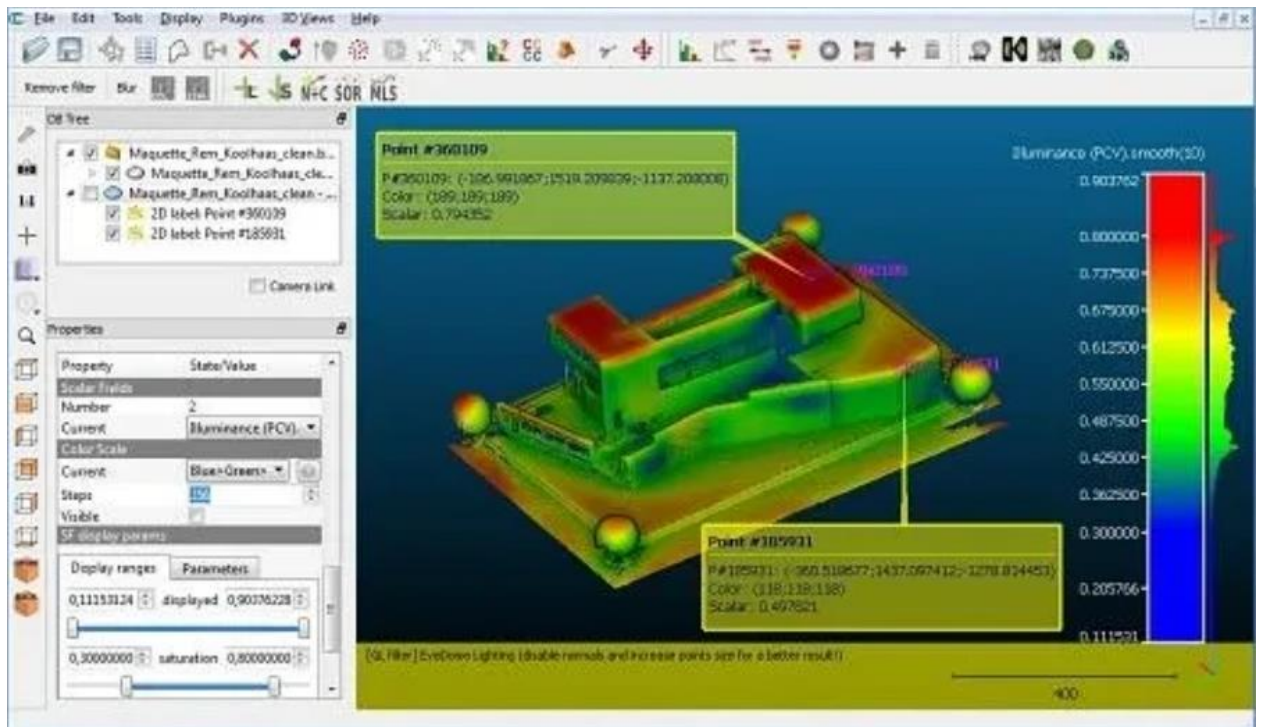


Рис 2.3. Обробка LiDAR зйомки у програмі CloudCompare

RADAR потребують спеціальних інструментів через складність сигналу. Їх зазвичай опрацьовують у наукових пакетах на зразок ESA SNAP, що дозволяє виконувати корекції, інтерферометрію, фільтрацію та побудову висотних моделей. Після первинної обробки такі дані також можна імпортувати в QGIS або ArcGIS для подальшого картографічного аналізу.

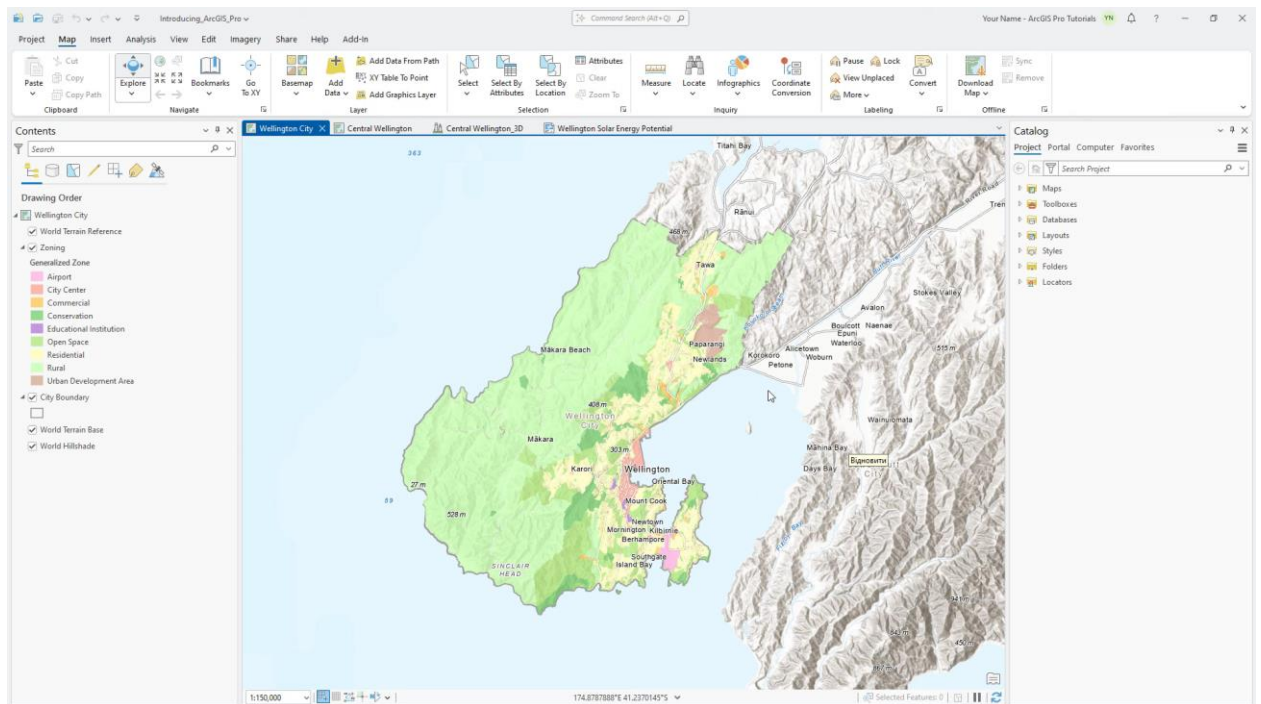


Рис. 2.4. Обробка зображень Radar зйомки за допомогою сервісу ArcGIS

Таким чином, супутникове, LiDAR- та RADAR-сканування використовує свої власні формати зберігання, але всі вони сумісні з сучасними ГІС-системами та інструментами 3D- і радарної обробки. Це забезпечує можливість комплексного аналізу лісових територій, створення точних моделей рельєфу, моніторинг змін рослинності та виявлення різноманітних природних і техногенних процесів.

Висновок до розділу 2. В другому розділі ми провели аналіз наявних цифрових систем особливості їх використання, обробки та форматування, через які сервіси їх можна переглядати та формувати. Особливості їх створення, загальні помилки при їх створенні.

РОЗДІЛ 3

ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ПОШИРЕННЯ ЛІСІВНИЧИХ ПРАКТИК ТА ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

3.1. Цифрові платформи та інструменти для обміну знаннями та поширення передового досвіду в лісівництві

Сучасний стан та організаційно-економічне забезпечення сільського господарства України потребують реформування відповідно до змінних економічних умов, розвитку світових ринків та необхідності забезпечення продовольчої безпеки. За таких обставин особливу увагу слід приділити можливостям адаптації галузі до цифрових продуктів та рішень з метою підвищення ефективності діяльності, раціонального використання ресурсів, дотримання санітарних норм, а головне – дотримання рівня конкурентоспроможності.

Стрімкий розвиток цифрових технологій суттєво вплинув майже на кожен галузь, зокрема й на освіту. Інтеграція цифрових платформ у професійну освіту являє собою трансформаційний процес, що має потенціал для значного підвищення якості навчання та розвитку. Традиційні методи професійної освіти, які часто покладаються на особисте навчання та друковані матеріали, все частіше доповнюються або навіть замінюються цифровими платформами, які пропонують велику кількість переваг. Цей перехід зумовлений необхідністю зробити освіту доступнішою, гнучкішою та ефективнішою у вирішенні різноманітних проблем студентів у сучасному професійному середовищі, що швидко розвивається і постійно змінюється. Одне з головних завдань професійної освіти - забезпечити, щоб навчання було актуальним, сучасним і відповідало останнім галузевим стандартам і практикам. Цифрові платформи можуть вирішити цю проблему, забезпечуючи активне та інтерактивне навчальне середовище, в якому контент може постійно оновлюватися, щоб відображати останні досягнення в різних галузях.

На цих платформах можна розміщувати широкий спектр ресурсів, зокрема відеолекції, інтерактивні симуляції та оновлення в режимі реального часу, забезпечуючи студентам доступ до найактуальнішої інформації та практик [25]. До того ж, цифрові платформи сприяють індивідуалізації навчання. Традиційне навчання в аудиторії часто не може задовольнити індивідуальні потреби кожного студента через брак часу та універсальний підхід. На противагу цьому, цифрові платформи можуть запропонувати індивідуальні навчальні траєкторії, адаптивні технології навчання та аналітику, яка допомагає виявити та усунути індивідуальні прогалини в навчанні. Така персоналізація не лише покращує навчальний процес, а й підвищує загальну ефективність професійної освіти, гарантуючи, що студенти здобувають конкретні навички та знання, яких вони потребують.

Сучасне лісівництво переживає еру цифрової трансформації, відому як Forest 4.0, що передбачає інтеграцію передових технологій для підвищення ефективності, стійкості та прозорості управління лісовими ресурсами. У цьому контексті, цифрові платформи та інструменти набувають критичного значення як механізми для обміну знаннями та поширення передового досвіду між науковцями, практиками, політиками та громадськістю [47].

Внесок технологій Індустрії 4.0 у лісову галузь зосереджений на широкому спектрі видів діяльності: від ведення лісового господарства, заготівлі та транспортування деревини до реалізації продукції. Останній у переліку процес, який охоплює продаж, дистрибуцію та обслуговування, стосується також діяльності з обслуговування кінцевої продукції упродовж усього її життєвого циклу. Технології Індустрії 4.0 застосовують для збирання та аналізу великої кількості даних, які стосуються ланцюга постачання деревини, маючи на меті інформаційну підтримку процесів прийняття рішень. До питань, вирішення яких, виходячи з міжнародного досвіду, уже сьогодні передбачають застосування технологій Індустрії 4.0, варто віднести: прогнозування та виявлення лісових пожеж, розроблення динамічних моделей їх розповсюдження. виявлення комах-шкідників (використання датчиків для

запису шумів всередині дерева, а за допомогою хмарних обчислень та технологій інтернету речей. зберігання та передавання їх для віддаленого аналізу) та хвороб (використання алгоритму штучного інтелекту, який дешифрує аерофотознімки, щоб можна було нанести на карту ураження грибковими патогенами), які можуть завдати пошкоджень деревам. виявлення незаконних рубок (алгоритми штучного інтелекту можуть опрацювати величезні обсяги даних, що надходять від акустичних звуків у лісі або супутникових зображень). оцінювання фізичних та біофізичних властивостей лісів, їхнього ресурсного потенціалу. оптимізація процесів заготівлі деревини (рекомендація певних способів заготівлі для певних умов) на основі аналізу часу, витрат і продуктивності заготівельних операцій. контроль та попередження нелегальної торгівлі деревиною (відстеження продукції на основі використання потенціалу технології блокчейн для зберігання даних стосовно безпечних і незмінних транзакцій). оптимізація процесів лісопиляння та виробництва (підвищення ефективності, безпеки, зниження витрат і підвищення якості робіт, для задоволення вдосконалення планування виробництва). покращення обслуговування клієнтів через удосконалення процесу продажу (клієнти також можуть віртуально дослідити столярні та меблеві рішення для своїх кімнат або будинків до прийняття рішення щодо придбання товарів). Отже, кожна компанія (чи її філії) будуть пов'язаним та матимуть повне бачення потреб і статусу інших. Сигнали попиту та пропозиції, що генеруються в будь-який час, миттєво поширюються по мережі [19].

Уряд ухвалив постанову про видачу деяких дозвільних документів у сфері лісового господарства в електронній формі до 1 червня 2027 р. у межах раніше започаткованого експериментального проєкту. Зокрема це стосується лісорубного квитка та сертифіката про походження лісоматеріалів і виготовлених з них пиломатеріалів.

Цифровізація дозвільних документів допомагає ефективно контролювати діяльність підприємств у сфері лісозаготівлі, продажу та

експорту деревини, а також протидіяти незаконними вирубками лісів та тіньовому обігу деревини.

«Система ЕОД допомагає оперативно простежувати рух деревини на всіх етапах лісозаготівельних робіт, а також в поточному часі бачити залишки лісопродукції на кожній лісосіці. Саме для повноцінного та прозорого функціонування системи ЕОД необхідні е-лісорубний квиток та е-сертифікат», - наголосив Віктор Смаль.

Електронна форма дозвільних документів забезпечує:

- спрощення порядку видачі та отримання дозвільних документів;
- захист від фальсифікації;
- оперативність та ефективність управління для держави та бізнесу;
- простежуваність обігу деревини від місця заготівлі до реалізації.

«Фактично ми вперше в історії України створили наскрізний цифровий ланцюг прослідковуваності руху деревини від заготівлі до експорту. І це одна з причин того, що Єврокомісія віднесла Україну до країн із низьким рівнем ризику за європейським Регламентом запобігання знелісенню (EUDR). Це найвищий можливий статус серед експортерів деревини до ЄС», – підсумував голова Держлісагентства.

Нагадаємо, цей проєкт координує Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів. Участь у проєкті беруть Державне агентство лісових ресурсів, Міністерство цифрової трансформації, а також постійні лісокористувачі та власники лісів [20].

Цифрові платформи виступають як централізовані або децентралізовані онлайн-середовища, які сприяють взаємодії, спільному використанню даних та стандартизації практик.

Цифрові платформи – це інтегровані системи, які об'єднують різні джерела даних для комплексного управління лісом. Вони дозволяють лісовим менеджерам моделювати різні сценарії, відстежувати зміни та ділитися планами управління.

Платформи на кшталт SilviaTerra або Forestry.io (глобальні аналоги) пропонують інструменти для інвентаризації, оперативного планування та звітності, базуючись на даних ДЗЗ та алгоритмах ML [45]. В Україні це може бути реалізовано на основі Геоінформаційних систем (ГІС) та цифрових лісових кадастрів.

Функція обміну: Наукові установи можуть завантажувати стандартизовані методики оцінки ризиків (наприклад, пожеж чи шкідників), а практики – ділитися фактичними даними про реалізацію цих методик та їх результати.

Decision Support Systems (DSS) – це програмні інструменти, які комбінують бази даних, моделі та введені користувачем параметри для надання індивідуальних рекомендацій, що підтримують процес прийняття рішень [48].

Фахівці зауважують зростання інтересу аграріїв до digital – застосунків. Наприклад, від початку війни один із світових лідерів у розробці інтелектуальних систем для точного землеробства – EartDayliAnalytics у співпраці з AgriLab відкрив вільний доступ до різних цифрових платформ усім українським аграріям.

У результаті, сьогодні за допомогою Croptical (платформи для супутникового моніторингу і аналізу погодних даних від EartDayliAnalytics) аграрії опрацьовують вже більше 500000 га у різних регіонах країни. При цьому «новинки» впровадили і зовсім невеликі фермерські господарства та навіть ті аграрії, які були впевнені, що вся ця цифровізація – не для них [19].

Ці платформи зосереджені безпосередньо на трансфері знань та інновацій.

Приклади: Європейські мережі, як-от ROSEWOO D4.0 та Forest-based Sector Technology Platform (FTP), створюють Knowledge Platform for Regional Forest Innovation, де збирають та поширюють цифрові інструменти та кращі практики. FAO також розвиває колекцію інноваційного програмного забезпечення, як-от Open Foris [49].

Приклад: Прототипи веб-базованих DSS, як-от UnderSCORE, розроблені для оцінки та врахування біорізноманіття лісового підліску, яке часто ігнорується, і допомагають менеджерам порівнювати тенденції між регіонами [46]. Функція обміну: DSS-платформи забезпечують поширення науково обґрунтованих знань у доступній формі, дозволяючи лісівникам застосовувати кращі практики без глибокого занурення у складні наукові моделі.

Дослідження [50] зосереджене на можливостях своєчасного виявлення лісових пожеж за допомогою аналізу звукового спектру на основі технології інтернету речей та обґрунтували використання нових безкоштовних автоматичних інструментів із використанням моделей на основі згорткових нейронних мереж із дуже високою роздільною здатністю та безкоштовних повітряних і супутникових зображень для кількісної оцінки деревного покриву лісів у посушливих регіонах на глобальному рівні. Здійснили системний аналіз літератури для того, щоб окреслити потенціал застосування технології індустрії 4.0 на всіх етапах лісокористування – від лісової ділянки до готової продукції. Запропонували структуру для забезпечення цілісного уявлення про лісове господарство на засадах Індустрії 4.0 з охопленням окремих елементів ланцюга постачання деревини. У дослідженні [50] наголошено, що величезна кількість даних, згенерованих у процесі охоплення ланцюга постачання деревини, можна використати для вилучення відповідної інформації та удосконалення процесу управління всім ланцюгом постачання – від лісових ділянок до виробництва лісопродукції. Аналогічно, застосовані нові технології можуть також створити кіберфізичне середовище для проектування та виробництва нових виробів з деревини, оптимізуючи в такий спосіб відповідні процеси, припустили, що Індустрія 4.0 має великий потенціал у створенні сталої промислової вартості на основі згаданої концепції TBL . Окрім цього, відомі та сталі бізнес-моделі SBM (англ. Shinwoo Banking Machines) охоплюють цю концепцію та враховують багато особливостей, а також довкілля та суспільство загалом. Вони мають важливе значення для управління та впровадження інноваційних бізнес-процесів для сталого

розвитку шляхом прийняття стратегій циркулярної економіки (CE), таких як звуження, уповільнення та закриття ресурсного циклу, що робить їх ключовими рушійними силами досягнення конкурентної переваги та сталого розвитку назагал [18].

Коли йдеться про цифрові сільськогосподарські платформи, такі провідні приклади, як Xarvio від BASF, FieldView від Bayer і CropWise від Syngenta, є добре відомими галузевими тестами. Однак, окрім цих знаних корпоративних платформ, численні урядові та науково-дослідні платформи також відіграють вирішальну роль у просуванні сільськогосподарської цифровізації.

Наразі глобальне сільське господарство переживає глибоку трансформацію платформ і вони перетворюються на подвійну систему: з одного боку, є суспільно-орієнтовані платформи, а з іншого – комерційні платформи, очолювані підприємствами. Обидва типи платформ створюють окремі мережі цінностей, працюючи разом, щоб стимулювати цифрову трансформацію та сталий розвиток сільського господарства.

У сфері публічних платформ платформа ЄС FaST виділяється як провідна ініціатива. Використовуючи космічні дані з таких систем, як Copernicus і Galileo, а також широкий спектр публічних і приватних джерел даних, FaST прагне стати провідною у світі платформою для створення та повторного використання сільськогосподарських рішень. Завдяки інтеграції центрів сільськогосподарських даних, у багатьох європейських країнах платформа має модульний дизайн, який підтримує реалізацію сільськогосподарської політики ЄС. Крім того, він сприяє сталому розвитку та підвищує конкурентоспроможність сектора завдяки розпізнаванню зображень на основі машинного навчання та інтеграції Інтернету речей, даних державного сектору та контенту, створеного користувачами.

Подібним чином система YoPay Agric (Уганда) надає сільськогосподарські послуги безпосередньо сільським фермерам, покращуючи доступ до сільськогосподарської інформації та послуг. Ця

платформа спрямована на покращення потоку інформації та надання послуг у сільській місцевості, допомагаючи фермерам приймати обґрунтовані рішення.

ІКТ-платформа Міжнародного інституту досліджень напівпосушливих культур також пропонує своєчасну цільову інформацію, таку як прогнози погоди, ринкові ціни, поради щодо вирощування врожаю та діагностує шкідників і хвороби. Ці послуги, які надаються через мобільні додатки, дають змогу фермерам отримати доступ до інструментів підтримки прийняття рішень, підвищити продуктивність і краще керувати своїми фермами.

Хоча ці платформи є некомерційними, вони відіграють вирішальну роль у подоланні цифрового розриву, підтримці розвитку сільського господарства та забезпеченні продовольчої безпеки. Вони озброюють фермерів надійними інструментами для боротьби зі змінами клімату, нестабільністю ринку та технологічними прогалинами. Навпаки, корпоративні цифрові платформи, створені сільськогосподарськими гігантами, технологічними компаніями та транскордонними інвесторами, трансформують практику сільськогосподарського виробництва набагато швидшими темпами.

На відміну від публічних платформ, корпоративні цифрові платформи більш комерційно орієнтовані та відіграють головну роль у сільськогосподарському ланцюжку створення вартості. Ці платформи – це не просто інноваційні продукти, розроблені агротехнологічними компаніями; вони стають ключовим рушієм прогресу сільськогосподарських технологій. Основна цінність корпоративних платформ полягає в пропонуванні низки точних послуг для сільськогосподарських практиків, включаючи управління врожаєм, застосування пестицидів, прогноз погоди та моніторинг ґрунту [22].

Платформа Xarvio від BASF є одним із найвпливовіших інструментів цифрового сільського господарства в усьому світі, зосереджених на покращенні росту культур і врожайності. Надаючи фермерам точні дані та підтримку в прийнятті рішень, Xarvio допомагає оптимізувати управління виробництвом. Його основні функції включають точний висів, розумне застосування пестицидів і захист рослин. Платформа об'єднує супутникові

зображення, дані про погоду, інформацію про ґрунти тощо, щоб запропонувати фермерам комплексний інструмент управління фермою, який дає їм змогу контролювати та керувати різноманітною діяльністю на своїй землі.

Платформа Bayer FieldView є ще однією великою інновацією в цифровому сільському господарстві. Вона надає фермерам розумніші інструменти прийняття рішень для оптимізації виробництва [22].

Модулі FieldView включають збір інформації, створення рецептів застосування пестицидів, розвідку полів і аналіз даних, які допомагають фермерам уточнювати стратегії сівби та покращувати здоров'я культур і врожайність шляхом збору та аналізу даних.

FieldView чудово придатна для інтеграції даних, поєднуючи дані про погоду, якість ґрунту, здоров'я врожаю та використання пестицидів в єдину платформу. Це пропонує фермерам комплексну підтримку прийняття рішень.

Компанія Bayer також представила інструменти для точного внесення добрив і пестицидів у FieldView, що дає змогу фермерам мінімізувати відходи та знизити виробничі витрати за допомогою цільового застосування [22].

Платформа CropWise компанії Syngenta добре адаптується до регіональних сільськогосподарських потреб. Його сім основних модулів – Commodity Pro, Planting, Protector, Spray Assist, Imagery, Operations, Seed Selector і Sustainability – утворюють комплексну систему управління сільським господарством, яка підтримує точне та наукове управління від посадки до збирання врожаю.

3.2. Розробка та впровадження систем дистанційного навчання для фахівців лісового господарства

Для ефективної підготовки майбутніх фахівців лісового господарства, необхідно вирішити дві головні проблеми: по-перше, забезпечити можливість отримання здобувачами глибоких фундаментальних знань і, по-друге,

підвищити якість навчання, розвинути їх творчі здібності, їх прагнення до безперервного набуття нових знань і умінь за рахунок зміни підходів до організації освітнього процесу; по-третє, застосувати активні методи та інноваційні технології [23].

Науковцями інноваційні технології трактуються за різними підходами як: змістовна техніка реалізації освітнього процесу; сукупність і порядок функціонування всіх особистісних, інструментальних і методологічних засобів для досягнення освітніх цілей, досягнення освітніх результатів. Вибір інноваційних технологій навчання з позицій компетентісного підходу виходить з необхідності синтезу ряду технологій, за якого здобувач стає активним суб'єктом навчально-пізнавальної і професійної діяльності, а також створюються умови, що сприяють розвитку фахової компетентності особистості.

Значну роль у підготовці сучасних фахівців відіграє інтеграція цифрових технологій, таких, як системи дистанційного навчання, віртуальні навчальні середовища, імерсивні технології, цифрові моделі та симулятори. Використання таких інструментів дає змогу моделювати складні виробничі процеси в реалістичних умовах, що сприяє кращому засвоєнню матеріалу та формуванню практичних навичок без ризику пошкодження техніки чи втрати врожаю [24].

Одним із перспективних напрямів є застосування технологій віртуальної та доповненої реальності, які дозволяють проводити тренування в умовах, максимально наближених до реальних, і значно підвищують рівень підготовки спеціалістів. VRтехнології дають можливість створювати інтерактивні симулятори роботи з сільськогосподарською технікою, навчати агрономічних методів у віртуальному середовищі, а також відпрацьовувати кризові сценарії, що є важливим для забезпечення безпеки та ефективності роботи в агросфері [24].

Розробка ефективної системи дистанційного навчання для фахівців лісового господарства – це комплексний процес, спрямований на забезпечення

їх безперервного професійного розвитку та швидке впровадження інноваційних технологій. На відміну від загальних освітніх платформ, система дистанційного навчання у лісівництві має бути високоспеціалізованою та орієнтованою на практичні навички та польову роботу.

Серед інноваційних технологій виокремлюємо модульне навчання, сутність якого полягає в тому, щоб здобувач міг самостійно працювати із запропонованою йому індивідуальною програмою, що включає банк інформації і методичне керівництво, які пристосовані до індивідуальних потреб особистості і рівня її базової підготовки. Як інноваційний різновид запропоновано інтегративно-модульну технологію, яка є одночасно: - цілісною рівневою дидактичною системою, в якій кожен її компонент (цільовий, змістовий, організаційний, оцінно-результативний), кожен її елемент (модуль, зв'язки інтеграційні, методи навчання, оцінка результатів, форма взаємодії) і вся система в цілому зорієнтовані на формування професійної компетентності майбутніх фахівців лісгосподарського профілю з урахуванням специфіки їх майбутньої професійної діяльності та етапів навчання в ЗВО; - процесом професійної підготовки, в ході якого здійснюється поетапне формування готовності до професійної діяльності; - сукупністю умов, що дають можливість самостійного вибору здобувачем лісгосподарської галузі індивідуальної траєкторії формування готовності до професійної діяльності, що забезпечує йому конкурентну перевагу на ринку праці. Під інтегративно-модульною технологією розумітимемо освітній процес, що характеризується спільністю цілей, завдань, підходів навчання здобувачів, системно-предметною організацією на основі модулів, виділення етапів і рівнів, а також методів і прийомів навчання, що забезпечують становлення пізнавальної здатності орієнтуватися в інформаційному полі і в навчальній ситуації і на цій основі сприяють формуванню професійних компетентностей для самостійного вирішення практичних завдань та готовності до професійної діяльності. При використанні інтегративно-модульної технології обсяг одержуваної інформації безпосередньо залежить

не стільки від кількості виділених годин, скільки від розширення пошуку і зв'язування інформації, як по горизонталі, так і по вертикалі в чіткій відповідності зі специфікою одержуваної спеціальності [23].

Спочатку необхідно провести ретельний аналіз потреб цільової аудиторії, яка включає лісничих, інженерів-таксаторів, техніків та керівний персонал. Визначаються ключові прогалини у знаннях, що часто стосуються освоєння ГІС-технологій, дистанційного зондування та новітніх методик управління лісовими пожежами і шкідниками. На основі цього аналізу формулюються чіткі навчальні цілі, які мають бути вимірними та досяжними.

Центральним елементом системи є Платформа управління навчанням (LMS), яка повинна підтримувати високу інтерактивність, можливість мобільного доступу (що критично важливо для працівників у віддалених районах) та ефективно відстежувати прогрес навчання для цілей офіційної сертифікації [22].

Наступний етап – створення спеціалізованого контенту. Він має включати не просто відеолекції, а й симуляції реальних виробничих ситуацій, таких як планування лісозаготівельних операцій з урахуванням екологічних обмежень або діагностика хвороб дерев. Використання віртуальної та доповненої реальності (VR/AR) є особливо цінним, оскільки дозволяє безпечно відпрацьовувати навички управління лісовою технікою, проводити віртуальні "польові" обходи або візуалізувати дані інвентаризації безпосередньо на місцевості. Інший важливий аспект – це оперативне оновлення навчальних модулів, особливо тих, що стосуються нормативно-правової бази та стандартів лісової сертифікації. Контент має бути структурований у вигляді коротких, сфокусованих навчальних модулів, що полегшує засвоєння матеріалу при обмеженому часі [23].

Після розробки системи дистанційного навчання запускається пілотний проєкт для тестування функціональності та ефективності курсів. Успішне впровадження системи дозволяє стандартизувати рівень підготовки фахівців по всій країні, зменшити витрати на логістику традиційного навчання та

забезпечити безперервний доступ до передового досвіду та актуальної наукової інформації.

Використання цифрових технологій у навчанні працівників лісової галузі є не лише доцільним, а й необхідним кроком для забезпечення сталого розвитку галузі. Інтеграція VR/AR, дистанційного навчання та симуляційних платформ дозволяє значно підвищити якість освіти, скоротити термін адаптації нових працівників і сприяти ефективному впровадженню інновацій у лісогосподарське виробництво. Лісова галузь України відіграє ключову роль в економіці країни, проте сучасні виробничі процеси та технологічні зміни висувають нові вимоги до кваліфікації працівників [24].

Однією з основних проблем є дефіцит кваліфікованих кадрів. Сучасне лісове господарство передбачає використання автоматизованих систем, сенсорних технологій, супутникового моніторингу та цифрових рішень для управління господарством. Працівники, які приходять на підприємства, не завжди володіють необхідними навичками для роботи з цими інструментами. Компаніям доводиться організовувати додаткове навчання персоналу вже в процесі роботи, що потребує ресурсів та часу [24].

Попри зазначені труднощі, в Україні поступово формуються сприятливі тенденції щодо модернізації системи навчання фахівців. Одним із таких позитивних зрушень є активне поширення онлайн-освіти, яка дозволяє фахівцям безперервно підвищувати свою кваліфікацію, адаптуючись до нових технологій.

Платформи дистанційного навчання пропонують курси з різних сфер лісового господарства господарствами, що сприяє розширенню доступу до знань для працівників, незалежно від їхнього місця проживання. Цифрові технології інтегруються в навчальні програми, що дозволяє студентам набувати компетентностей, необхідних для роботи в умовах сучасного бізнесу. Використання систем управління лісовими підприємствами, впровадження навчальних платформ, моделювання виробничих процесів сприяють підвищенню якості підготовки фахівців [24].

Важливу роль у трансформації системи підготовки кадрів відіграють державні та приватні ініціативи, спрямовані на підтримання професійного розвитку працівників лісової галузі. Спільні програми профільних навчальних закладів та державних інституцій передбачають проведення тренінгів, стажувань, семінарів, спрямованих на впровадження інноваційних підходів до організації лісового виробництва. Такі заходи створюють передумови для формування нової генерації фахівців, здатних працювати в умовах цифрової трансформації сільського господарства.

Сучасна ситуація в лісовій освіті України демонструє одночасне співіснування викликів і прогресивних змін, що створює підґрунтя для подальшого реформування системи підготовки персоналу відповідно до потреб цифрової економіки. Віртуальна реальність – це високорозвинена форма комп'ютерного моделювання, яка дозволяє користувачу заглибитися у штучний світ і безпосередньо діяти в ньому за допомогою спеціальних сенсорних пристроїв, які зв'язують його з аудіовізуальними ефектами. При цьому зорові, слухові, моторні відчуття користувача замінюються їхньою імітацією, яка генерується комп'ютером [24]. Технології віртуальної та доповненої реальності належать до інноваційних інструментів, що активно впроваджуються у різні сфери діяльності, зокрема в систему підготовки кадрів лісового комплексу.

Віртуальна реальність передбачає створення повністю цифрового середовища, в якому користувач повністю занурюється у змодельовану ситуацію, взаємодіючи з об'єктами, що імітують реальні процеси. Учасник навчання, використовуючи спеціальні пристрої, зокрема VR-окуляри чи шолом, опиняється у тривимірному просторі, який може відтворювати робочі операції, виробничі лінії, польові умови чи будь-які інші аспекти аграрної діяльності. Доповнена реальність, на відміну від віртуальної, поєднує реальне середовище з цифровими елементами, які накладаються на фізичний світ. Технології AR дозволяють за допомогою мобільних пристроїв, планшетів або AR-окулярів бачити додаткову інформацію про об'єкти, інструкції, графічні

підказки, що значно полегшує виконання виробничих завдань, налаштування обладнання чи навчання на робочому місці [24].

Переваги використання технологій віртуальної та доповненої реальностей у навчанні в агросфері:

1. Імітація реальних умов. Використання VR та AR дозволяє створювати інтерактивні тренажери, які максимально точно відтворюють умови реальної роботи на підприємстві. Такі тренування допомагають працівникам практикувати свої навички у безпечному середовищі, де вони можуть стикатись з різними ситуаціями без ризику для здоров'я або ресурсу обладнання. Це особливо важливо в лісі, де умови роботи можуть бути небезпечними, а помилки – дорогими.

2. Підвищення безпеки. Технології VR/AR дозволяють проводити навчання, яке моделює потенційно небезпечні ситуації, такі, як аварії або непередбачувані обставини на виробництві, без реального ризику. Таким чином, працівники можуть відпрацьовувати свої дії під час надзвичайних ситуацій, що значно підвищує рівень безпеки на підприємстві.

3. Гейміфікація процесу. Впровадження елементів гейміфікації через VR/AR технології робить навчальний процес цікавішим. Використання віртуальних світів, задач та рівнів може значно підвищити мотивацію працівників до навчання. Змагання, досягнення та візуалізація прогресу створюють умови для ефективнішого засвоєння матеріалу, оскільки учасники зацікавлені в досягненні нових результатів і в покращенні своїх навичок [24].

Ці переваги разом формують ефективне середовище для навчання, яке дозволяє знизити витрати на матеріальні ресурси, підвищити продуктивність та швидкість адаптації працівників до нових умов роботи. Технології віртуальної та доповненої реальності (VR/AR) стають потужними інструментами у навчанні лісової галузі, допомагаючи покращити якість підготовки працівників та студентів. У світі вже є кілька прикладів їх успішного застосування, які демонструють великий потенціал цих технологій. Університет Джорджії в США активно використовує VR для навчання

студентів. Студенти можуть віртуально працювати, де їм демонструються різні методи обробки ґрунту, вирощування рослин і боротьби з шкідниками. VR дозволяє моделювати складні погодні умови, такі як посухи або повені, що дає студентам можливість відпрацьовувати стратегії управління лісами в умовах, які важко передбачити в реальному житті. Це дозволяє значно знизити ризик помилок і дає можливість глибше розуміти, як адаптувати агрономічні практики до змін клімату. VR дає можливість створювати тренажери для безпечної роботи з сільськогосподарською технікою. Компанія John Deere розробила AR-додатки, які дозволяють операторам важкої техніки отримувати інструкції прямо на місці, через смартфони чи спеціальні окуляри. Це дозволяє швидко ознайомитись із правильними налаштуваннями і режимами роботи машин, не відволікаючись на застарілі інструкції. Таке використання AR суттєво знижує час на навчання операторів, підвищує безпеку і зменшує кількість технічних помилок [24].

Завдяки застосуванню технологій VR/AR навчальний процес стає більш інтерактивним, результативним і безпечним. Такі рішення дозволяють суттєво економити час і ресурси, підвищують рівень безпеки та дають можливість працівникам тренувати навички, які в реальних умовах можуть бути надзвичайно складними чи потенційно небезпечними. Використання VR і AR під час адаптації нових співробітників підприємств лісового господарства сприяє швидшому оволодінню професійними функціями та загальному зростанню ефективності праці. Ці технології надають можливість ознайомитися з виробничими процесами, обладнанням і особливостями лісових робіт ще до виходу на місцевість або до підприємства, що зменшує рівень напруги й невпевненості на початкових етапах роботи.

Віртуальна реальність дозволяє створювати інтерактивні симуляції виробничих ситуацій, які повністю відтворюють реальні умови – керування технікою, виконання польових операцій, роботу з системами зрошення чи використання засобів захисту рослин. Працівники можуть багаторазово

повторювати потрібні дії у віртуальному середовищі, доводячи навички до автоматизму без ризику пошкодження техніки або втрати врожаю [24].

Технології доповненої реальності забезпечують підтримку працівника безпосередньо на робочому місці: під час виконання завдань він може отримувати візуальні підказки, інструкції чи інші інтерактивні елементи, накладені на реальний простір. Це допомагає запобігати поширеним помилкам, особливо в період адаптації, коли фахівець ще не повністю розуміє всі нюанси виробничих процесів.

Застосування VR та AR дозволяє мінімізувати потребу в постійному супроводі з боку наставника, адже цифрові інструменти частково беруть на себе функцію контролю та підтримки. Працівник швидше опановує нові завдання, стає впевненішим у своїх діях, що позитивно впливає на продуктивність праці. Імітація аварійних ситуацій у VR сприяє формуванню навичок оперативного реагування на нестандартні випадки, що в майбутньому дозволяє зменшити ризик виникнення виробничих простоїв чи пошкоджень обладнання. Інтеграція VR та AR у процес адаптації нових працівників сприяє прискоренню входження у професійну діяльність, зниженню рівня виробничих ризиків і формуванню кваліфікованіших кадрів, що, зрештою, підвищує ефективність аграрного виробництва. Практичне застосування VR та AR у підготовці кадрів, охоплює різні напрями, серед яких особливу увагу привертає навчання трактористів, лісівників і технічного персоналу. Для операторів сільськогосподарської техніки створюються симулятори, що відтворюють процеси управління тракторами, комбайнами та іншими машинами в умовах, максимально наближених до реальних. Віртуальні тренажери дозволяють без ризику відпрацювати запуск обладнання, регулювання механізмів, маневрування на полі, а також реагування на нестандартні ситуації, зокрема вихід з ладу вузлів чи несприятливі погодні умови.

3.3. Приклади успішного використання цифрових інструментів для підвищення кваліфікації та навчання лісівників

VR дає можливість створювати тренажери для безпечної роботи з сільськогосподарською технікою. Компанія John Deere розробила AR-додатки, які дозволяють операторам важкої техніки отримувати інструкції прямо на місці, через смартфони чи спеціальні окуляри. Це дозволяє швидко ознайомитись із правильними налаштуваннями і режимами роботи машин, не відволікаючись на застарілі інструкції. Таке використання AR суттєво знижує час на навчання операторів, підвищує безпеку і зменшує кількість технічних помилок [24].

Сфера лісового господарства демонструє значний прогрес завдяки впровадженню цифрових інструментів, що підкріплено реальними фактами. Одним із найбільш успішних напрямків є використання Геоінформаційних систем (ГІС) у поєднанні з дистанційним зондуванням Землі (ДЗЗ). Наприклад, як засвідчує досвід, застосування ГІС-продукту QGIS та аналіз космічних знімків Sentinel 2 дозволяє ефективно виявляти ділянки незаконних рубок. У ході одного дослідження вдалося виділити майже 30 таких ділянок загальною площею близько 110 гектарів шляхом порівняння знімків різних років та інтеграції даних Global Forest Watch, підтверджуючи високу точність супутникового моніторингу у контролі за лісовим фондом. Такий підхід значно розширює можливості оперативного екомоніторингу та протипожежного обстеження, що раніше було трудомістким та займало багато часу при традиційних польових вимірюваннях.

Іншим вагомим прикладом є використання VR-тренажерів для підвищення кваліфікації та безпеки праці. Хоча відкриті дані часто стосуються медичної або військової сфери, світові виробники лісозаготівельної техніки, як-от John Deere та Ponsse, активно впроваджують високоточні симулятори для операторів харвестерів та форвардерів. Ці тренажери дозволяють відпрацьовувати складні маневри, техніки рубки та оптимізацію роботи у

віртуальному середовищі. Фактично, тренувальний процес на симуляторах дозволяє скоротити час адаптації нових операторів і знизити ризики пошкодження дороговартісної техніки та травматизму, що є прямим економічним ефектом.

Крім того, системи ДЗЗ дають змогу не лише виявляти порушення, а й здійснювати точну інвентаризацію та прогнозування. Використання радарних (SAR) методів інтерферометрії та поляриметричної інтерферометрії дозволяє оцінювати такі параметри лісу, як біопродуктивність та таксаційні характеристики, з точністю, яка значно перевершує традиційні методи. Це забезпечує більш повну інформацію про характеристики лісового покриття та дозволяє створювати прогнозні картограми розподілу лісоінвентаризаційних параметрів, що є основою для науково обґрунтованого, сталого управління лісовим господарством.

Ще один приклад застосування VR у господарстві демонструє компанія Ritchie Bros у Канаді. Вони створили спеціальну VR-програму для навчання працівників безпеки при роботі з важкими механізмами. Моделювання реальних ситуацій, таких, як аварії або інші надзвичайні події, дає змогу відпрацьовувати дії в умовах безпеки. Такі тренування дозволяють значно знизити ймовірність травм на робочих місцях, оскільки працівники проходять необхідне навчання в контрольованому середовищі. Завдяки використанню VR/AR технологій, навчання стає інтерактивнішим, ефективнішим та безпечнішим. Такі програми дозволяють значно заощаджувати час та ресурси на навчання, підвищують рівень безпеки, а також забезпечують працівникам можливість відпрацьовувати навички, які можуть бути надзвичайно складними або небезпечними в реальних умовах.

Ефективність упровадження цифрових технологій у лісовому господарстві базується на підвищенні точності інформації та швидкості управлінських рішень, що підтверджується багатьма практичними проєктами. Наприклад, застосування геоінформаційних систем (ГІС), зокрема рішень на основі ESRI ArcGIS, дало змогу лісогосподарським підприємствам Північної

Америку відмовитися від паперових карт на користь точного електронного інвентаризаційного обліку. Поєднання високоточних GPS-пристроїв і планшетів з інтегрованими ГІС-мапами дозволило польовим бригадам скоротити тривалість таксаційних робіт на 30–40%, оскільки відпала необхідність у ручному замальовуванні карт та подальшій офісній обробці інформації. Збір даних відбувається одразу в цифровому форматі, що зводить до мінімуму помилки, пов'язані з перенесенням інформації вручну.

Іншим вагомим прикладом є використання дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема супутникових знімків та LiDAR-сканування (лазерного сканування з повітря). У Скандинавії, де активно розвинене інтенсивне лісове господарство, технологія LiDAR стала стандартом для оцінки запасів деревини та планування рубок. LiDAR-дані, які фіксують висоту і структуру лісового покриву з високою деталізацією, дозволяють моделювати об'єм деревини на ділянці з точністю до 95% без необхідності суцільних наземних вимірів. Це значно підвищує економічну ефективність та швидкість підготовки лісових планів [20].

Крім того, застосування мобільних додатків для збору польових даних стало критично важливим для моніторингу шкідників та хвороб. У рамках європейських проектів розроблено програми, які дозволяють лісничим ідентифікувати ознаки ураження та передавати геоприв'язані фотографії до центральної бази даних у режимі реального часу. Це забезпечує оперативне картографування зон ризику та дозволяє миттєво реагувати, впроваджуючи карантинні та санітарні заходи. Це фактично замінює багатогодинні звіти та телефонні дзвінки, забезпечуючи скоординовану відповідь на біологічні загрози лісу.

Використання цифрових інструментів у лісовому господарстві призвело до значного підвищення точності, оперативності та економічної ефективності управління лісовими ресурсами. Одним із найбільш значущих досягнень є впровадження Лідар-сканування (LiDAR) у Скандинавських країнах, зокрема Фінляндії та Швеції, як основного методу інвентаризації лісу. Фактично, дані

LiDAR, отримані з повітряних платформ, дозволяють моделювати об'єм деревини на лісових ділянках з точністю до 90-95%, що значно перевершує традиційні польові вимірювання, які можуть мати похибку до 20%. Це дозволяє лісовим компаніям, як-от Stora Enso, не лише точніше планувати лісозаготівлю, а й оптимізувати логістику транспортування деревини, мінімізуючи простой та витрати.

У галузі моніторингу та нагляду активно застосовується комплекс дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС). Зокрема, в Україні та інших країнах Східної Європи використання супутникових знімків високої деталізації, інтегрованих у ГІС-платформи, дало змогу суттєво посилити протидію незаконним вирубкам. Спеціалізовані системи, що автоматично зіставляють зображення за різні періоди, визначають різкі зміни у структурі лісового покриву й спрямовують інспекції лише на ті території, де є ознаки можливих порушень. У результаті час виявлення незаконних вирубок скорочується з кількох тижнів до кількох днів, а робота інспекторів зосереджується на найпроблемніших ділянках, що суттєво підвищує ефективність контролю.

У сфері запобігання та контролю лісових пожеж також наявні успішні практики. У США та Австралії, де пожежі становлять серйозну небезпеку, використовують прогнозні моделі, поєднані з метеорологічними показниками та ГІС-технологіями. Такі системи, зокрема моделі динаміки поширення полум'я, безперервно оцінюють рівень вологості ґрунту, силу вітру та характеристики рослинного покриву. Це дає змогу пожежним підрозділам заздалегідь визначати можливий напрямок і швидкість руху вогню з високою точністю, що є вирішальним для своєчасної евакуації людей та оптимального розміщення сил протипожежного реагування.

Професійна освіта може швидше реагувати на зміни в попиті на навички, адаптуючи навчальні програми відповідно до потреб роботодавців. Викладачі можуть використовувати цифрові інструменти для проведення вебінарів, інтерактивних лекцій та семінарів, що підвищує якість освіти. Зменшення

використання паперових матеріалів і переведення навчання в онлайн-формат може сприяти охороні навколишнього середовища та покращенню екологічної ситуації. Цифрові інструменти у сфері освіти мають велике значення для України, оскільки вони сприяють модернізації освітньої системи й адаптації до сучасних вимог ринку праці та можуть стати важливим фактором у покращенні якості підготовки спеціалістів і забезпеченні їхньої конкурентоспроможності; підвищенню рівня кваліфікації педагогів, рівня надання освітніх послуг відповідними закладами освіти та їх популяризації. Це створює величезний потенціал для трансформації навчального процесу і підвищення його ефективності [26].

Отже, впровадження цифрових інструментів у професійну освіту в Україні може суттєво покращити якість навчання, підвищити доступність освіти та розвинути у студентів необхідні навички для успішної кар'єри в сучасному світі.

Залучення сучасних технологій у навчальний процес формує й удосконалює в студентів ключові цифрові компетентності, які високо цінуються на сучасному ринку праці. Крім того, цифрові інструменти можуть спрощувати взаємодію між освітніми установами та бізнесом, створюючи передумови для проходження практики, стажувань і виконання спільних проєктів. Використання аналітичних систем дає змогу закладам освіти ефективно відстежувати та оцінювати успішність навчання, визначати проблемні аспекти та коригувати освітні програми. Онлайн-формати стимулюють обмін досвідом між українськими та іноземними закладами освіти, відкриваючи нові шляхи для навчання, підвищення кваліфікації й посилення міжнародного партнерства України з іншими державами. Технології віртуальної та доповненої реальності створюють нові підходи до набуття практичних навичок: зокрема, студенти можуть тренуватися в моделюваному середовищі, що мінімізує ризики у реальних умовах [26].

Платформи, що забезпечують можливість обговорення та спільної діяльності, сприяють соціальному навчанню – формуванню комунікативних

умінь і навичок командної роботи, які мають значення для професійного розвитку. Цифрові середовища виступають ключовою опорою дистанційної освіти, дозволяючи підтримувати безперервність навчального процесу в періоди кризових обставин, зокрема під час пандемій чи інших надзвичайних подій.

У зв'язку із впровадженням інформаційних технологій у навчально-виховний процес змінилися освітні цілі. Акцент змістився із «засвоєння знань» на формування «компетенцій», відбувається переорієнтація на особистісно орієнтований підхід. Тобто головним завданням навчання стає не передача певного об'єму знань, а формування умінь здобувати й обробляти інформацію, навичок мислення високого рівня: аналізувати, синтезувати, оцінювати. Усе це потребує впровадження в навчальний процес інноваційних педагогічних технологій.

Онлайн-курси можуть бути спрямовані на формування таких компетентностей, як критичне мислення, тайм-менеджмент та емоційна компетентність, що є необхідними для побудови успішної кар'єри.

Використання фотосфер для моніторингу лісів є інноваційним та ефективним підходом, що дозволяє отримувати детальну візуальну інформацію про стан лісових ділянок та їх зміни. Цей метод забезпечує високоякісні зображення, які можна використовувати для різних завдань, від оцінки здоров'я лісу до планування лісогосподарських заходів.

Використання фотосфер для вивчення і поширення кращих лісівничих практик – дослідницький підхід, який має значний потенціал для оптимізації лісового господарства та забезпечення екологічної стабільності. Фотосфера – це 360-градусова візуальна інформація про середовище, що дозволяє отримати детальні уявлення про лісові екосистеми та їх стани.

Фотосфера є своєрідною базою даних, яка збирає та зберігає матеріали у вигляді зображень різних об'єктів та явищ. Вона може бути корисною для вивчення і поширення кращих лісівничих практик. Фотосфери, або панорамні зображення на 360 градусів, мають широкий спектр застосувань у лісовому

господарстві. Вони дозволяють отримувати детальну візуальну інформацію про лісові ділянки, що може бути корисним для моніторингу, управління та планування.

Висновок до розділу 3. В третьому розділі провели аналіз наявних цифрових систем та якість їх впливу на навчання спеціалістів та поширення кращих лісівничих практик у лісове господарство.

РОЗДІЛ 4

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ В УКРАЇНІ

4.1. Аналіз нормативно-правової бази та інфраструктурних умов для впровадження цифрових рішень у лісовому господарстві України

Розвиток цифрових технологій у лісовому господарстві України ґрунтується на двох ключових складових – законодавчому забезпеченні та наявності відповідної технічної інфраструктури. Упродовж останніх років держава активно формує нормативну основу цифровізації галузі, зосереджуючи увагу на електронному документообігу, простежуваності походження деревини та створенні інтегрованих інформаційних систем. Паралельно із цим постає питання достатності технічних, кадрових та організаційних ресурсів лісогосподарських підприємств, що визначає реальні можливості впровадження цифрових інструментів на практиці.

Важливою складовою нормативної бази є запровадження електронного лісорубного квитка, унормованого наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України №520 від 21.07.2023 р. [28]. Документ визначає структуру електронної форми, вимоги до заповнення, порядок видачі та принципи інтеграції квитка з іншими цифровими системами. Його впровадження забезпечує прозорість дозвільних процедур, мінімізує можливість фальсифікацій та сприяє формуванню єдиної цифрової бази заготівельних робіт.

Комплексний облік лісопродукції регламентується Інструкцією з ведення електронного обліку деревини, затвердженою наказом №621 від 27.09.2021 р. [29], яка визначає порядок внесення інформації про заготівлю, перевезення та реалізацію деревини, стандарти роботи з мобільними пристроями та правила синхронізації даних. Інструкція фактично задає технічний каркас для побудови наскрізного цифрового обліку, що дозволяє в

режимі реального часу контролювати рух деревини від ділянки до кінцевого споживача.

Важливим кроком у напрямі цифрової трансформації є Постанова Кабінету Міністрів України №625 від 30.05.2025 р. [30], яка започаткувала експериментальний проєкт із повної цифровізації дозвільних документів у лісовій галузі. Нормативний акт передбачає запровадження електронного сертифіката походження деревини, що дозволяє відстежувати походження продукції на всіх етапах – від заготівлі до експорту. Це є необхідною умовою для відповідності європейським вимогам щодо простежуваності, зокрема EUDR.

Функціонування електронних сервісів забезпечується також загальнодержавними законами, які формують цифрову правову екосистему:

- Закон України «Про електронну ідентифікацію та електронні довірчі послуги» №2155-VIII від 5 жовтня 2017 року [31], що унормовує застосування КЕП і електронних підписів;

- Закон «Про електронні документи та електронний документообіг» №851-IV від 22 травня 2003 року [32], який визначає правила зберігання і правовий статус електронних документів;

- Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» №554-IX від 13 квітня 2020 року [33], який регламентує формування єдиної системи геопросторових даних, необхідної для інтеграції лісових карт, матеріалів таксації та супутникової інформації.

Посилення контролю за оборотом деревини забезпечує Постанова КМУ №689 від 13.06.2024 р. [34], яка запровадила обов'язкову фотофіксацію процесу завантаження деревини у транспортні засоби в межах системи ЕОД. Такий підхід підвищує прозорість внутрішнього ринку деревини та зменшує ризики маніпуляцій під час транспортування.

Однак ефективність цифрових рішень визначається не лише законодавством, а й станом інфраструктури, яка повинна забезпечити безперервну роботу цифрових платформ. Одним із ключових факторів є

доступність телекомунікаційних мереж. У багатьох лісових масивах України якість мобільного інтернету залишається недостатньою, що ускладнює використання мобільних терміналів ЕОД, GPS-фіксації та оновлення даних у режимі реального часу. У таких умовах працівники змушені працювати в офлайн-режимах із подальшою синхронізацією, що створює ризики затримок і технічних збоїв.

Другим важливим елементом є матеріально-технічне забезпечення лісогосподарських підприємств. Для повноцінної роботи цифрових систем необхідні сучасні планшети та смартфони для майстрів, GNSS-приймачі із високою точністю, дрони для моніторингу, ноутбуки для обробки даних, а також ліцензійне програмне забезпечення. У ряді підприємств технічна база потребує оновлення, що стримує запровадження нових електронних сервісів.

Інтеграція цифрових рішень у лісовому господарстві неможлива без створення єдиної інформаційної екосистеми, яка поєднуватиме електронний облік, геопросторові дані, супутниковий моніторинг, дозвільні документи та внутрішні бази даних. На практиці існують проблеми сумісності систем і форматів, що ускладнює обмін інформацією між підрозділами ДП «Ліси України», Держлісагентством та державними реєстрами.

Окрему роль у впровадженні цифрових технологій відіграє рівень цифрової компетентності працівників. Використання ГІС-платформ, обробка супутникових даних, робота з електронними підписами, ведення електронних документів та застосування дронів потребують додаткового навчання. Важливим інфраструктурним аспектом є кібербезпека та збереження даних.

Нормативно-правове забезпечення цифровізації лісового господарства в Україні сьогодні є достатньо розвиненим і включає ключові інструменти для впровадження електронного документообігу, простежуваності та використання просторових даних. Водночас повномасштабна цифрова трансформація галузі залежить від усунення інфраструктурних обмежень, модернізації технічної бази підприємств, інтеграції інформаційних систем та підвищення цифрової компетентності працівників.

4.2. Рекомендації щодо інтеграції цифрових інструментів у систему лісового господарства України

Передусім важливо забезпечити завершення переходу до повного електронного документообігу у сфері лісокористування. Впровадження електронного лісорубного квитка відповідно до наказу Міндовкілля №520 від 21.07.2023 має супроводжуватися автоматизацією процесів перевірки, завантаження даних та передачі інформації між державними реєстрами. Доцільно передбачити створення механізму автоматичного формування електронного сертифіката походження деревини після закриття лісорубного квитка, що значно спростить контроль простежуваності деревини та унеможливить розбіжності між різними формами документів. Така інтеграція також стане важливим етапом з точки зору майбутньої відповідності європейському Регламенту EUDR, що висуває високі вимоги до перевірки походження лісопродукції.

Окремої уваги потребує підвищення функціональності системи електронного обліку деревини. Аналіз показує, що ЕОД є технічно ефективним інструментом, проте його потенціал не використовується повною мірою через недостатню взаємодію з іншими державними платформами та різний рівень технічного забезпечення лісгоспів. Рекомендовано створити єдиний хмарний модуль інтеграції, який поєднуватиме ЕОД із Національною інфраструктурою геопросторових даних, державними кадастрами, модулем електронних квитків та супутниковими інструментами контролю. Це дасть змогу здійснювати автоматичну перевірку меж лісових ділянок, відстежувати зміни покриву за супутниковими знімками та запобігати незаконним рубкам через співставлення фактичних і дозволених місць заготівлі. У перспективі такі рішення можуть підтримувати алгоритми штучного інтелекту, що аналізуватимуть великі обсяги просторових даних і попереджатимуть працівників про знайдені відхилення.

Значну увагу потрібно приділити модернізації технічної інфраструктури лісогосподарських підприємств. Наявність мобільного інтернету у лісових масивах часто є фрагментарною, що суттєво ускладнює використання мобільних терміналів, GNSS-приймачів та цифрових карт. Тому доцільно передбачити впровадження комбінованої схеми передачі даних, що поєднує онлайн-режим там, де він доступний, з можливістю автономної роботи пристроїв із подальшою синхронізацією у місцях стабільного покриття. Для майстрів лісу необхідно забезпечити достатню кількість сучасних мобільних пристроїв з довговічними акумуляторами та захистом від вологи та ударів, оскільки саме вони є основними користувачами системи ЕОД у польових умовах.

Також важливо розширити застосування безпілотних технологій для інвентаризації, моніторингу санітарного стану та контролю за рубками. Дрони дають змогу швидко отримувати інформацію про пошкодження лісів, вітровали, окремі дерева з ознаками всихання та потенційні незаконні рубки. Рекомендовано розробити єдині галузеві стандарти використання дронів, включаючи методики зйомки, частоту обльотів, вимоги до геоприв'язки та зберігання даних. Це дозволить підвищити точність моніторингу та скоротити витрати часу на проведення польових інвентаризацій.

Наступним важливим напрямом інтеграції цифрових інструментів є подальший розвиток державної системи геопросторової інформації, центральним елементом якої вже виступає офіційний геопортал «Ліси України» [35]. Створення цього ресурсу стало ключовим кроком у напрямі відкритості даних, оскільки геопортал об'єднує різні шари просторової інформації про ліси: межі лісових кварталів і виділів, категорії лісів, ділянки виконаних і запланованих рубок, дані про лісові пожежі, інформацію про санітарний стан та окремі природоохоронні обмеження. Проте потенціал платформи може бути значно розширений, якщо інтегрувати у її структуру всі компоненти матеріалів лісовпорядкування, що наразі залишаються частково недоступними або представленими в неповному вигляді. Насамперед йдеться

про необхідність повного оцифрування таксаційних описів, електронних планшетів, меж постійних лісокористувачів, інформації про інженерну інфраструктуру, лісові дороги, полезахисні смуги та території з особливими режимами охорони. Наявність цих даних у геопорталі дозволила б сформувати комплексну, національно уніфіковану систему лісового картографування.

Для підвищення ефективності прийняття управлінських рішень доцільно забезпечити інтеграцію геопорталу з результатами супутникового моніторингу в режимі, наближеному до реального часу. Це відкриває можливість автоматично відстежувати зміни лісового покриття, визначати появу вирубок, осередків всихання чи вітровалів, а також здійснювати аналіз сезонної та міжрічної динаміки насаджень. Доповнення геопорталу багатоспектральними даними Sentinel-1 та Sentinel-2, а також інструментами побудови індексів NDVI, NBR або NDMI дозволить значно розширити коло лісівничих задач, які можна вирішувати без проведення додаткових польових обстежень. У перспективі можливо інтегрувати дані LiDAR-зйомки (повітряної або супутникової) для точнішого визначення висотної структури лісів і моделювання запасу.

Важливим практичним завданням є створення на базі геопорталу «Ліси України» єдиної лісової ГІС-платформи з розширеним функціоналом для внутрішнього користування підприємствами. Така платформа має бути доступною на різних рівнях – від майстрів лісу до інженерно-технічного персоналу та керівництва надлісництв і регіональних офісів. Вона повинна забезпечувати не лише перегляд карт, а й можливість взаємодії з оперативними даними: перегляд інформації про видані електронні лісорубні квитки, їх просторову прив'язку, стан виконання рубок, завантажені фотофіксації, маршрути патрулювання, а також аналітичні інструменти для планування робіт. У цьому контексті надзвичайно важливо інтегрувати геопортал з Єдиною системою електронного обліку деревини, що дозволить відображати на карті повний цикл руху деревини – від місця заготівлі до моменту оформлення супровідних документів і транспортування. Такий підхід

забезпечить безпрецедентний рівень прозорості, адже кожна операція буде прив'язана до конкретного виділу та часу виконання.

Перспективним напрямом розвитку геопорталу є створення спеціалізованих інструментів для моніторингу пожеж, шкідників і хвороб лісу. Інтеграція даних ДСНС, метеорологічних сервісів, індексу пожежної небезпеки та сповіщень про теплові аномалії дозволить формувати оперативні карти ризиків. Аналогічно, дані дистанційного зондування можуть бути використані для автоматичного виявлення потенційних осередків всихання, що є надзвичайно актуальним у контексті поширення короїдів та інших стовбурових шкідників. Такий інструментарій створить передумови для швидкого реагування та планування санітарних заходів.

Подальше розширення функціоналу геопорталу включає також можливість створення «кабінету майстра лісу» або мобільного додатку для працівників, де можна буде фіксувати результати огляду ділянок, додавати фотографії, вказувати місця лісопорушень, позначати сліди пожеж, буреломів чи незаконних рубок. Дані, внесені майстрами в польових умовах, автоматично синхронізуватимуться з центральною базою і відобразатимуться в ГІС у вигляді тематичних шарів. Це значно скоротить час між виявленням проблеми та її опрацюванням на рівні Держлісагенства.

Не менш важливим є підвищення цифрової компетентності працівників. Ефективність впровадження будь-яких технологій залежить від того, наскільки користувачі здатні їх застосовувати. Рекомендовано створити багаторівневу систему навчання, що включатиме базові курси для майстрів лісу, спеціалізовані тренінги для інженерів, а також програми підвищення кваліфікації для керівників підрозділів. Зміст таких курсів має охоплювати роботу з мобільними ГІС, використання GPS-приймачів, основи супутникового моніторингу, принципи електронного документообігу та правила кібербезпеки. Доцільним є також створення навчальних центрів на базі вищих навчальних закладів з можливістю регулярного оновлення навчальних програм відповідно до появи нових технологій.

Забезпечення кібербезпеки є критично важливим у контексті цифровізації. Під час воєнного стану системи, що містять просторові та операційні дані, повинні бути захищені від потенційних атак. Рекомендовано впровадити централізовану систему контролю доступу, резервне копіювання даних у хмарному середовищі, а також регулярний аудит безпеки. Важливим є розроблення внутрішніх політик користування службовими пристроями та мережевими ресурсами, оскільки людський фактор залишається однією з найпоширеніших причин порушення безпеки.

Таким чином, інтеграція цифрових інструментів у систему лісового господарства України потребує комплексного підходу, який передбачає посилення законодавчої бази, модернізацію технічних засобів, створення єдиної геоінформаційної платформи, удосконалення електронного документообігу, підвищення рівня підготовки персоналу та забезпечення кібербезпеки. Реалізація цих рекомендацій сприятиме підвищенню прозорості лісового господарства, покращенню оперативності управлінських рішень, зменшенню ризику незаконних рубок та ефективнішому використанню лісових ресурсів у довгостроковій перспективі.

4.3. Перспективи розвитку цифрових технологій у лісовому господарстві та їх вплив на розвиток галузі

Перспективи розвитку цифрових технологій у лісовому господарстві України визначаються поєднанням двох взаємопов'язаних факторів: потребою забезпечити прозорість та ефективність управління лісовими ресурсами і одночасно обмеженнями, пов'язаними з повномасштабною війною (рис. 4.1). Саме воєнні обставини значною мірою формують реалістичну траєкторію цифровізації галузі на найближчі роки, адже значні площі лісів залишаються недоступними, замінованими або зазнали серйозних пошкоджень, що унеможлиблює застосування традиційних методів лісовпорядкування. У таких умовах цифрові інструменти стали не лише засобом оптимізації роботи, а й

єдиним можливим способом моніторингу, контролю та збереження лісів на небезпечних або тимчасово окупованих територіях.

На основі самоаналізу перспектив впровадження нижче наводимо схему перспектив розвитку цифрових технологій в лісовому господарстві України.



Рис. 4.1. Структурно-логічна схема перспектив розвитку цифрових технологій у лісовому господарстві України

Очікується, що у середньостроковій перспективі в Україні буде розширено застосування дистанційних методів збору інформації про стан лісів. Важливу роль відіграватимуть супутникові дані, фотограмметрія та доступні технології БПЛА, які дозволяють отримувати об'єктивну інформацію без присутності людей на небезпечних ділянках. Ймовірно, що до завершення

війни саме супутниковий моніторинг стане основою для оцінки пожеж, вирубок, змін лісового покриву чи впливу вибухів боєприпасів. Більш складні технології, такі як масштабне LiDAR-сканування, залишатимуться обмеженими через підвищений ризик використання повітряного простору, однак після стабілізації безпекової ситуації вони стануть ключовим інструментом оновлення даних лісовпорядкування.

У найближчі роки зростатиме роль систем, що забезпечують контроль за рухом деревини та прозорість лісокористування. Цифрові сервіси, такі як електронний лісорубний квиток, електронний облік деревини, інтегровані геоінформаційні системи та GPS-трекінг лісовозів, матимуть ключове значення. Їх розвиток дозволить автоматично перевіряти маршрути транспортування, виявляти невідповідності та реагувати на потенційні порушення навіть у складних умовах воєнного часу. Таким чином, цифрові рішення стають інструментом не лише технологічної модернізації, а й антикорупційного захисту галузі.

Водночас прогнозується поступове впровадження елементів штучного інтелекту та аналізу великих даних, насамперед у напрямках, які не потребують великих фінансових вкладень. Це автоматичне виявлення пожеж на супутникових знімках, аналіз динаміки змін лісового покриву, прогнозування поширення шкідників і хвороб чи оцінка наслідків бойових дій для лісових екосистем. Розвиток складніших AI-рішень, пов'язаних із точним моделюванням таксаційних показників буде можливими за наявності додаткового фінансування з боку держави або інвесторів.

Очікується, що цифрові платформи для дистанційного навчання та обміну інформацією відіграватимуть дедалі більшу роль у професійній підготовці лісівників. Війна створила потребу у гнучких та доступних формах навчання, тому онлайн-курси, мобільні додатки та інтерактивні симулятори – зокрема цифрові мартелоскопи – стануть важливим елементом підвищення кваліфікації, особливо для молодих фахівців.

Узагальнюючи, можна виділити основні тенденції, які визначатимуть розвиток цифрових технологій у лісовому господарстві України в найближче десятиліття:

- переорієнтація на дистанційні методи моніторингу лісів, зокрема супутникову зйомку;
- зміцнення систем контролю та простежуваності деревини, що залишатиметься критичним під час війни та після її завершення;
- розвиток геоінформаційних платформ, які інтегруватимуть дані про пошкоджені та небезпечні території;
- впровадження технологій штучного інтелекту, орієнтоване передусім на аналіз доступних супутникових даних;
- посилення ролі дистанційної освіти та цифрових інструментів навчання, що є необхідним для покращення кадрового потенціалу галузі;
- готовність до масштабного технологічного оновлення після завершення війни, включно з комплексним LiDAR-скануванням, автоматизацією лісовпорядкування та інвентаризації лісів.

Висновок до розділу 4. У четвертому розділі провели аналіз перспектив впровадження цифрових систем у лісове господарство, і як вони посприяють на майбутнє розвитку лісового господарства.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що цифрова трансформація є ключовим фактором модернізації лісового господарства, а провідні країни світу вже активно використовують ГІС-системи, LiDAR, дрони, штучний інтелект, цифрові інвентаризаційні інструменти та електронні сервіси для управління лісовими ресурсами. Аналіз світового досвіду показав, що досягнення високої ефективності можливе лише за умови комплексної цифровізації всіх етапів – від моніторингу до логістики та контролю походження деревини. Особливу увагу приділено впливу повномасштабної війни на роботу галузі: цифрові технології стали фактично єдиним інструментом моніторингу недоступних або небезпечних ділянок, контролю за рубками та збереженням даних. Це підтверджує критичну важливість цифрових рішень у сучасних умовах та їхній потенціал для майбутнього відновлення лісового фонду.

Цифрові платформи є ефективним механізмом для поширення передових лісівничих практик, обміну професійними знаннями та організації дистанційного навчання. Розглянуті приклади міжнародних та українських платформ демонструють потенціал цифрових інструментів у підвищенні якості освіти, стандартизації знань та створенні відкритих спільнот фахівців. Встановлено, що сучасне навчання лісівників вимагає поєднання класичних підходів із інноваційними методами – VR-симуляціями, модульними курсами, інтерактивними середовищами та інтелектуальними системами оцінювання. Це забезпечує розвиток компетентностей, необхідних для роботи з новими технологіями у польових умовах, та сприяє швидшому впровадженню інновацій у практичну діяльність.

В Україні вже сформовано правові й організаційні передумови для впровадження цифрових технологій: електронний лісорубний квиток, електронний сертифікат походження деревини, системи ЕОД, ГІС-платформи. Разом із тим, аналіз нормативної бази засвідчив необхідність її подальшого оновлення з урахуванням стандартів ЄС та вимог EUDR. Розроблені

рекомендації передбачають створення єдиного цифрового напрямку розвитку лісового господарства, інтеграцію ДЗЗ, розвиток систем оперативного моніторингу, удосконалення інструментів дистанційного навчання та підготовку персоналу до роботи з новими технологіями. Прогноз розвитку галузі свідчить, що цифровізація стане основою її прозорості, екологічної відповідальності та відновлення після війни.

Узагальнюючи проведені дослідження, можна стверджувати, що цифрові інструменти відіграють визначальну роль у підвищенні ефективності лісового господарства, забезпеченні прозорості та адаптації галузі до сучасних викликів. Вони дозволяють оперативно збирати достовірні дані, підтримувати прийняття управлінських рішень, здійснювати контроль за господарськими операціями та організовувати якісну підготовку фахівців у дистанційній формі. В умовах воєнних загроз цифрові технології стали не лише інструментом розвитку, а й механізмом виживання галузі, забезпечуючи моніторинг недоступних територій та збереження важливої інформації. Результати роботи підтверджують, що подальша цифровізація є стратегічно необхідною для сталого управління лісами України, їх відновлення та інтеграції у європейський простір.

РЕКОМЕНДАЦІЇ

За результатами проведеного аналізу сформовано наступні пропозиції:

1. Завершити повну цифровізацію документообігу у лісовому господарстві, забезпечивши обов'язкове використання електронного лісорубного квитка, електронного сертифіката походження деревини та інтегрованих сервісів для обміну інформацією між підприємствами, центральними органами влади та контролюючими структурами.

2. Створити єдину державну лісову ГІС-платформу, яка включатиме цифрові матеріали лісовпорядкування, результати НІЛ, дані дистанційного зондування, про рубки, охоронні заходи та дані про реалізацію деревини, з можливістю доступу для майстрів, лісничих, інженерів та керівників.

3. Розвивати системи оперативного моніторингу лісів на основі ДЗЗ, дронів та автоматизованих алгоритмів виявлення незаконних рубок, вітровалів, пожеж та інших порушень, інтегрувавши їх у загальну інформаційну інфраструктуру галузі.

4. Удосконалити нормативно-правову базу, гармонізувавши її з вимогами EUDR та європейськими стандартами щодо простежуваності деревини, звітності та доступності геопросторових даних.

5. Запровадити стандарти оцифрування матеріалів лісовпорядкування.

6. Посилити кіберзахист цифрових ресурсів галузі, враховуючи воєнні ризики та необхідність збереження критично важливої інформації, запобігши несанкціонованим змінам або втраті даних.

7. Створити єдину ERP-систему для потреб ДП «Ліси України», яка б об'єднала фінансовий облік, виробниче планування, логістику деревини, управління персоналом та аналітику. Така система дозволить усунути дублювання інформації, підвищити точність даних і забезпечить інтеграцію електронним документообігом.

8. Запровадити механізми державної підтримки цифровізації лісового господарства, а саме інноваційних проєктів у галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Agricultural Electronics Corporation. Manual Band Dendrometers Technical Specifications.
2. Büttler R., Rosset C., Larrieu L. Reconnaître les arbres-habitats grâce à l'application habitat.sylvotheque.ch. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. 2021. 172(4). P. 242–245. DOI: <https://doi.org/10.3188/szf.2021.0242>
3. Cohen W. B., Maiersperger T. K., Gower S. T., Turner D. P. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. Remote Sensing of Environment. 2003. 84. P. 561–571.
4. DigiMedFor Pilot Projects [Електронний ресурс]. URL: <https://digimedfor.eu/pilots/> (дата звернення: 10.11.2025).
5. Donmez C., Berberoglu S., Erdogan M. A., Tanriover A. A., Cilek A. Response of the regression tree model to high resolution remote sensing data for predicting percent tree cover in a Mediterranean ecosystem. Environ. Monit. Assess. 2015. 187(2). DOI: 10.1007/s10661-014-4151-5.
6. Ehrlich-Sommer F. та ін. Sensors for Digital Transformation in Smart Forestry. Sensors. 2024. Vol. 24, No. 3. Article 798. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24030798>
7. Eriksson L. O. та ін. Prioritizing the retention of border zones... Forests Monitor. 2024. Vol. 1, No. 1. P. 99–121. DOI: 10.62320/fm.v1.i1.11
8. Field-Map Digital Solutions. Digital Caliper for Forestry [Електронний ресурс]. URL: [б. в.] (дата звернення: 07.09.2025).
9. Foody G. M., Boyd D. S., Cutler M. E. J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. Remote Sensing of Environment. 2003. 85(4). P. 463–474.
10. Gómez C., Wulder M. A., Montes F., Delgado J. A. Modeling Forest Structural Parameters... Remote Sensing. 2012. 4(1). P. 135–159.
11. Graham Y., Haddow B., Koehn P. Statistical Power and Translationese in Machine Translation Evaluation. 2020. DOI: 10.18653/v1/2020.emnlp-main.6

12. Guidelines on Closer-to-Nature Forest Management. 2023. ISBN 978-92-68-00207-0. DOI: 10.2779/898789.
13. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7, No. 3. P. 2971–2990. DOI: 10.3390/rs70302971
14. Kalisz D. E., Aluchna M. *Research and Innovation Redefined*. European Integration Studies. 2012. ISSN 1822–8402.
15. Knapp S. та ін. How species traits and affinity to urban land use control large-scale species frequency. *Diversity and Distributions*. 2009. 15(3). P. 533–546.
16. Kordi G., Salo J., Koukouvinou et al. *Systematic Literature Review of Forest Mapping Technologies*. 2023. ISBN 978-9963-711-98-7.
17. Laser and image-based data collection (WG1) [Електронний ресурс]. URL: <https://3dforecotech.eu/structure/wg1-laser-and-image-based-data-collection/> (дата звернення: 13.10.2025).
18. Levchenko V. V. та ін. Digital transformation of forestry: aspects of electronic accounting of wood.
19. LIDAR та RADAR [Електронний ресурс]. URL: <https://eos.com/uk/blog/lidar-ta-radar/> (дата звернення: 13.10.2025).
20. Liu S. та ін. Multi-omics analysis for identifying druggable targets in Alzheimer’s disease. *Nature Communications*. 2023. Vol. 23. Article 788.
21. Martelage Platform [Електронний ресурс]. URL: <https://martelage.sylvotheque.ch/> (дата звернення: 10.11.2025).
22. Mohan et al. MultiRefactor: Automated Refactoring To Improve Software Quality. 2017. DOI: <https://doi.org/10.17034/493b8a0f-4c58-4ac2-a909-5853eab1a9ff>
23. Møller M. S., Olafsson A. S. The Use of E-Tools to Engage Citizens. *Sustainability*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10103513>
24. Müller J. P., Schier F. Forest 4.0: Challenges and opportunities for a digitalized forest industry. *Forest Science*. 2019. Vol. 65, No. 3. P. 321–330.

25. News [Електронний ресурс]. URL: http://w.forest.gov.ua/novynu_derglis?Id=5603 (дата звернення: 10.11.2025).
26. Niculită M. Geomorphometric Methods for Burial Mound Recognition. *Sensors*. 2020. Vol. 20. Article 1192. DOI: 10.3390/s20041192
27. Rosset C. La valeur ajoutée de la digitalisation : être plus informé, connecté et agile. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*. 2021. 172(4). P. 198–204.
28. Ruckert A., Mielke E. A Review of Past Research on Dendrometers. *Forest Science*. 2000. Vol. 46, No. 4. P. 570–576.
29. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution [Електронний ресурс]. URL: <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab/> (дата звернення: 07.09.2025).
30. Singh R., Gehlot A., Akram S. V., Thakur A. K. та ін. Forest 4.0: Digitalization of forest using the Internet of Things (IoT). *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 34, Issue 8, Part B. P. 5587–5601.
31. Singh V. K. Leveraging Artificial Intelligence in Sales Management and HRM. 2024. ISSN 2327-798X. Vol. 24, No. 2.
32. Westoby M. J. та ін. Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
33. Zhang S. та ін. Additions to the genus *Savoryella*. *Phytotaxa*. 2019. DOI: 10.11646/phytotaxa.408.3.4
34. Абакуменко О. Діджиталізація банківського сектору України. *Фінансові дослідження*. 2016. № 1 (1). С. 69–75.
35. Антонюк В. В. Елементи діджиталізації адміністративного судочинства України. *Digitization and human rights : зб. тез міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Хмельницький, 30.03.2021*. С. 9–12.
36. Безкоштовні цифрові платформи для аграріїв [Електронний ресурс]. URL: <https://www.agrilab.ua/bezkoshtovni-tsyfrovii-platformy-dlya-agrariyiv/> (дата звернення: 06.11.2025).

37. Використання VR/AR у навчанні працівників агросфери.
38. Використання цифрових платформ для підвищення якості професійної освіти. DOI: <http://orcid.org/10.5281/zenodo.11442893>
39. Державне агентство лісових ресурсів України: веб-сайт [Електронний ресурс]. URL: <https://forest.gov.ua/news/administratyvni-posluhy-v-lisovomu-hospodarstvi-vydacha-lisorubnykh-kvytkiv> (дата звернення: 07.09.2025).
40. Заверюха М. М. Правова охорона лісів в умовах воєнного часу. Dnipro Scientific Journal of Public Administration, Psychology, Law. 2022. № 3. С. 164–167.
41. Задорожнюк Р. М. Інвентаризація соснових насаджень за даними стереограмметричної зйомки з БПЛА. 2023.
42. Закон України «Про електронні документи та електронний документообіг» [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/851-15> (дата звернення: 10.11.2025).
43. Закон України «Про електронну ідентифікацію та електронні довірчі послуги» [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2155-19> (дата звернення: 10.11.2025).
44. Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20> (дата звернення: 10.11.2025).
45. Інноваційні технології в лісовій промисловості: сучасний стан та перспективи розвитку. DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.6.45>
46. Інноваційні технології підготовки майбутніх фахівців лісового господарства.
47. Інструкція з ведення електронного обліку деревини (Наказ ДАЛРУ № 621 від 27.09.2021) [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1343-21> (дата звернення: 10.11.2025).
48. Лісовий портал [Електронний ресурс]. URL: <https://forestry.org.ua/> (дата звернення: 10.11.2025).

49. Марчук Н. А. Цифрові інструменти в професійній освіті України: історія, особливості впровадження та перспективи.
50. Мікулич Л. О. Вплив російсько-української війни на ліси України. Донецький нац. ун-т імені Василя Стуса. Вінниця.
51. Наказ Міністерства довкілля № 520 від 21.07.2023 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1485-23> (дата звернення: 10.11.2025).
52. Об'єктивна інформація щодо лісів України: веб-сайт [Електронний ресурс]. URL: <https://tlu.kiev.ua/nasna-dijalnist/profesijno-pro-lis/objektyvna-informacija-schodo-lisiv.html> (дата звернення: 29.09.2025).
53. Платформа відновлення лісів України [Електронний ресурс]. URL: <https://wwf.ua/?19713916/platforma-vidnovlennia-lisiv-ukrainy-onlain-rishennia-dlia-stvorennia-stiikykh-lisiv-prezentuvaly-vsesvitnii-fond-pryrody-wwf-ukraina-ta-softserve> (дата звернення: 10.11.2025).
54. Постанова КМУ № 625 від 30.05.2025 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/625-2025-п> (дата звернення: 10.11.2025).
55. Постанова КМУ № 689 від 13.06.2024 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/689-2024-п> (дата звернення: 10.11.2025).
56. Розуміння здоров'я лісу за допомогою дистанційного зондування. Частина II. Огляд підходів і моделей даних : веб-сайт [Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.3390/rs9020129> (дата звернення: 03.05.2024).
57. Руденко М. В. Розвиток цифровізації управління в сільськогосподарських підприємствах: теорія, методологія, практика : дис. ... д-ра екон. наук. Київ, 2020.
58. Смаль В. Ми створюємо найкращий в Європі ланцюг простежуваності руху деревини [Електронний ресурс]. URL: <https://forest.gov.ua/news/viktor-smal-my-stvoriuiemo-naikrashchyi-v-ievropi-lantsiuh-proslidkovuvanosti-rukhu-derevyny> (дата звернення: 07.09.2025).

59. Трушлякова А. Б. Розвиток діджиталізації в Україні: фактори впливу, переваги та виклики сьогодення. Економічні горизонти. 2018. № 4 (7). С. 186–191.

60. Цифрова аграрна революція [Електронний ресурс]. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tsyfrova-ahrna-revoljutsiya-abo-nova-era-innovatsiy-u-silskomu-hospodarstvi-tsyfrovi> (дата звернення: 10.11.2025).

ДОДАТКИ

Додаток 1

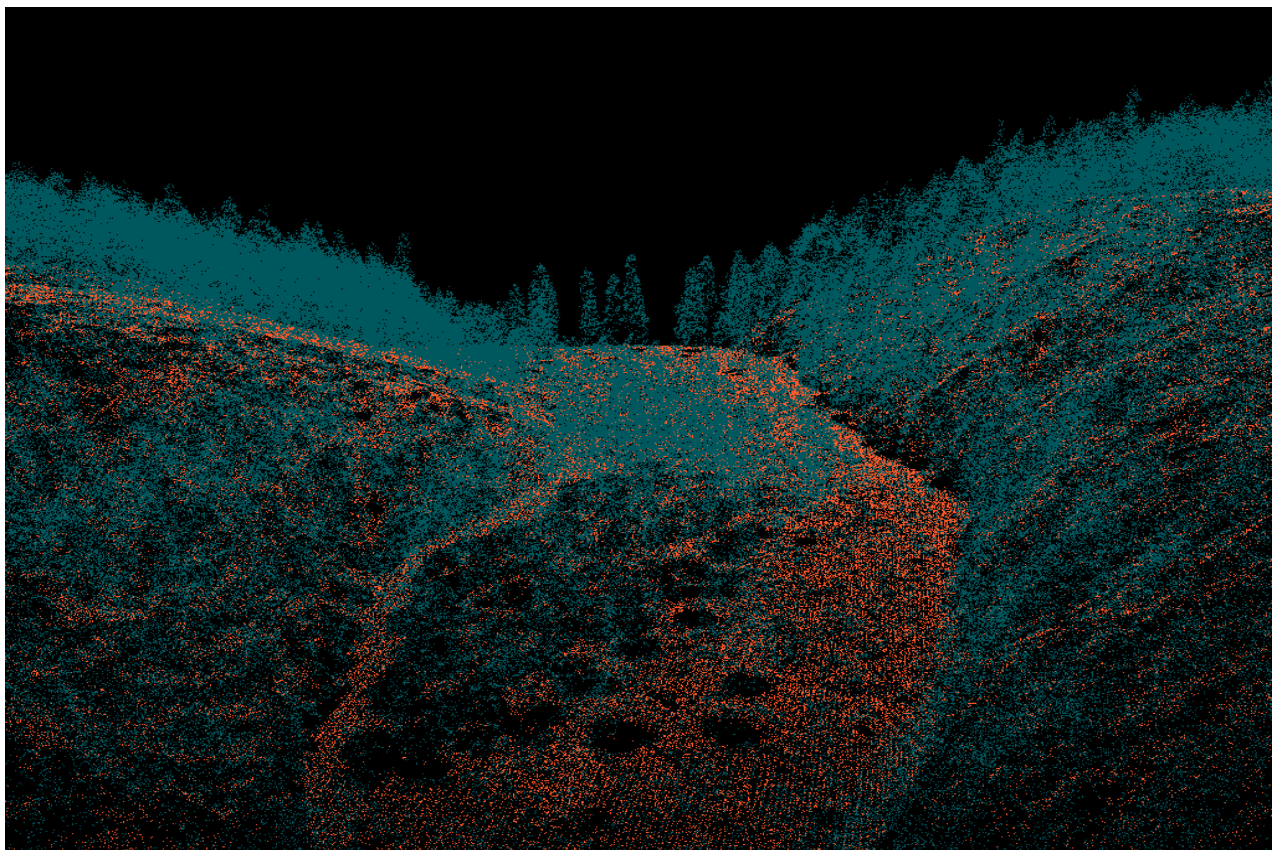


Рис 1.1. Приклад LiDAR сканування

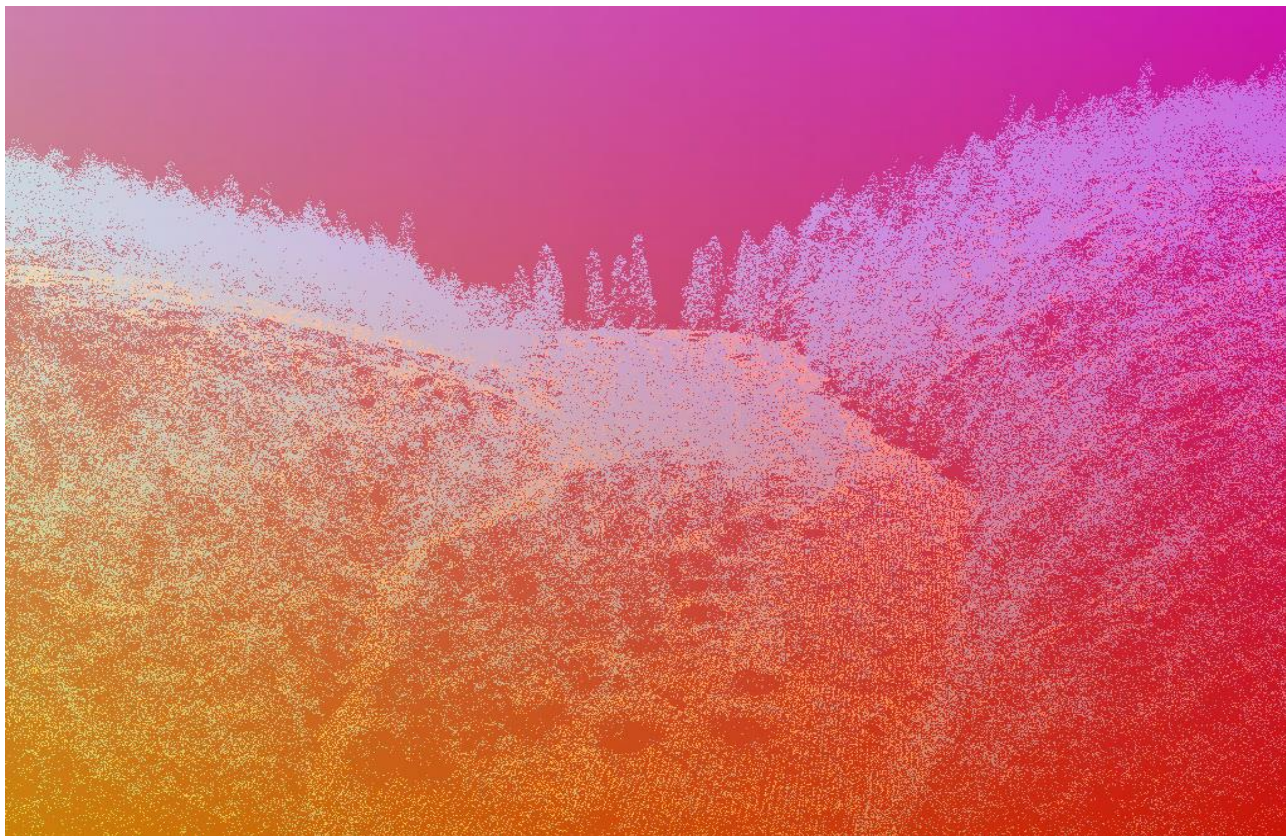


Рис 1.2. Приклад LiDAR сканування

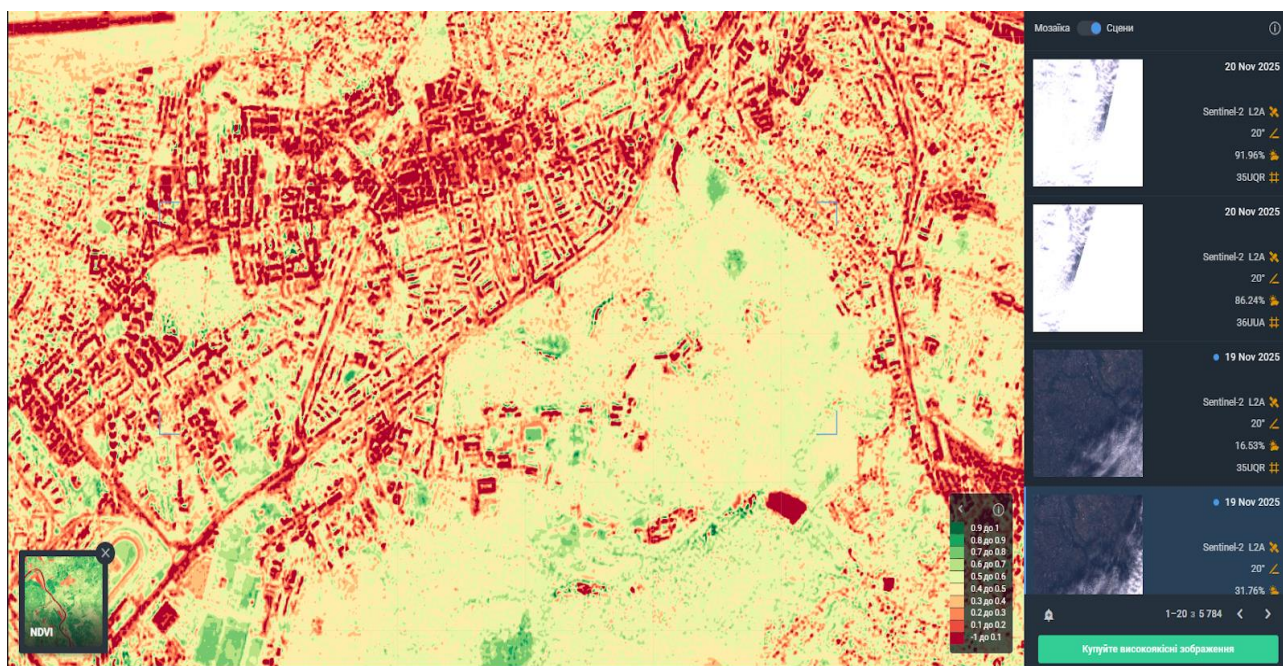


Рис 1.3. Супутниковий знімок зі спектром NDVI



Рис 1.4. Супутниковий знімок зі спектром який аналізує наявність лісового покриву

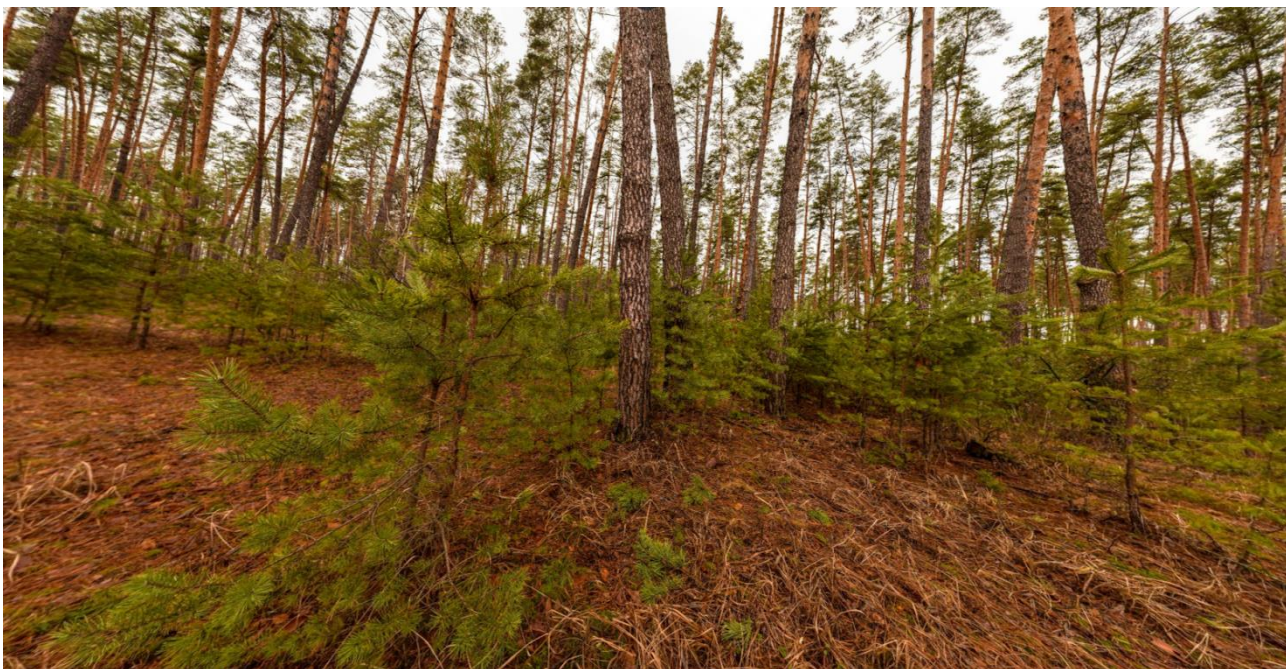


Рис. 1.5. Боярське лісництво 8 квартал виділ 1 <https://kuula.co/post/hlRlw>



Рис. 1.6. Боярське лісництво 12 квартал виділ 4 <https://kuula.co/post/53MdH>

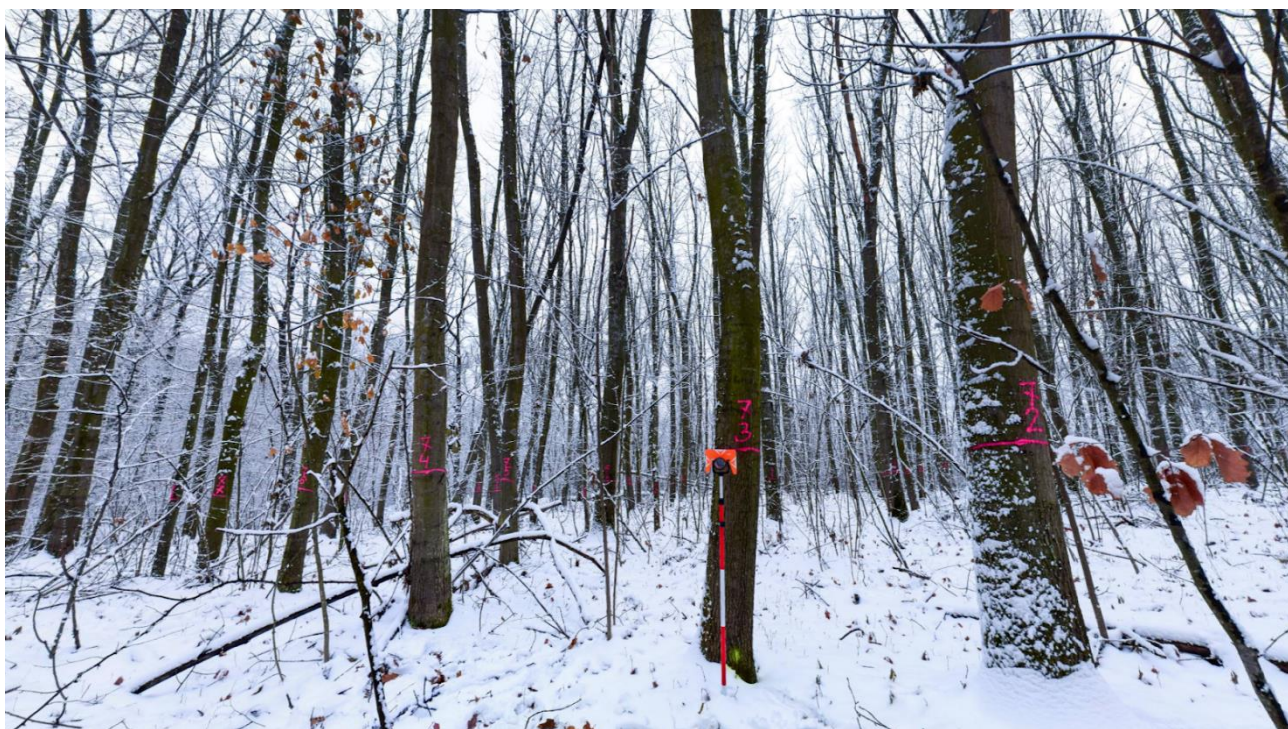


Рис. 1.7. Боярське лісництво квартал 12 виділ 5 <https://kuula.co/post/5ZLH2>



Рис. 1.8. Зображення вирубки лісу в районі Нова-Бандейрантис, штат Мату-Гросу, Бразилія, із супутника Sentinel. (<https://gijn.org/ua/istorii/vikoristanna-suputnikovih-znimkiv-u-rozsliduvannah-poradi-laboratorii-dokaziv-amnesty-international/>)