

О. Я. КРАВЕЦЬ

кандидат наук з фотограмметрії та картографії, доцент,
доцент кафедри геодезії та землеустрою

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ORCID: 0000-0001-7861-0640

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ

В статті наведено результати наукового дослідження, спрямованого на розв'язання актуальної проблеми цифровізації лісового господарства в умовах глобальних екологічних та антропогенних викликів. У ході дослідження було проведено критичний огляд ринку існуючого програмного забезпечення, що дозволило ідентифікувати фундаментальні недоліки сучасних систем. Зокрема, обмежену інтеграцію даних з різних джерел та недостатні аналітичні можливості. На основі аналізу сучасних методів одержання інформації про навколишнє середовище (дистанційне зондування, геоінформаційні системи, LiDAR) та дослідження особливостей лісових ресурсів було розроблено концептуальні вимоги до спеціалізованого програмного забезпечення та спроектовано багатofункціональну вебплатформу для автоматизованого моніторингу і поглибленого аналізу лісових ресурсів. Створено архітектуру, яка забезпечує об'єднання методів дистанційного зондування Землі, технологій лазерного сканування та класичної лісової таксації в межах єдиної ГІС-інфраструктури. Розроблена платформа реалізує комплексний підхід, поєднуючи в собі модулі інтерактивного картографування, точного кількісного та якісного обліку біоресурсів, а також інноваційну систему моніторингу розташування лісогосподарської техніки в реальному часі. Особливу увагу приділено функціоналу управління завданнями, що дозволяє автоматизувати призначення робіт та контроль їх виконання з прив'язкою до конкретних географічних координат. Запропонована вебплатформа є ефективним інструментом для переходу до моделі сталого лісокористування, забезпечуючи надійний механізм протидії деградації лісів, моніторингу наслідків кліматичних змін та загальну цифрову трансформацію виробничих процесів у лісовій галузі. Отримані результати можуть бути використані при створенні загальнодержавних систем екологічного моніторингу та побудові динамічних цифрових двійників лісових масивів.

Ключові слова: лісові ресурси, ГІС-технології, веб-платформа, дистанційне зондування, автоматизація моніторингу, LiDAR, стале лісове господарство, програмне забезпечення.

O. YA. KRAVETS

PhD in Photogrammetry and Cartography, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Geodesy and Land Management

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ORCID: 0000-0001-7861-0640

DESIGN OF AN AUTOMATED FOREST RESOURCE MONITORING SYSTEM

The article presents the results of a scientific study aimed at solving the urgent problem of digitalizing forest management in the face of global environmental and anthropogenic challenges. In the course of the study, a critical review of the existing software market was conducted, which allowed for the identification of fundamental shortcomings in modern systems, specifically limited integration of data from various sources and insufficient analytical capabilities. Based on the analysis of modern methods for obtaining environmental information (remote sensing, GIS, LiDAR) and the analysis of forest resource characteristics, conceptual requirements for specialized software were developed, and on their basis, a multifunctional web platform for automated monitoring and in-depth analysis of forest resources was designed. An architecture has been created that ensures the unification of Earth remote sensing methods, laser scanning technologies, and classical forest inventory within a single GIS infrastructure. The developed platform implements a comprehensive approach, combining modules for interactive mapping, accurate quantitative and qualitative accounting of bioresources, and an innovative system for real-time monitoring of forestry equipment location. Particular attention is paid to task management functionality, which allows for the automation of work assignments and control over their execution with reference to specific geographic coordinates. The proposed web platform serves as an effective tool for transitioning to a sustainable forest management model, providing a reliable mechanism for countering forest degradation, monitoring the consequences of climate change, and ensuring the overall digital transformation of production processes in the forestry sector. The results obtained can be utilized in the creation of nationwide environmental monitoring systems and the construction of dynamic digital twins of forest stands.

Key words: forest resources, GIS technologies, web platform, remote sensing, automated monitoring, LiDAR, sustainable forestry, software.



Постановка проблеми

Необхідність запровадження інноваційних підходів до ефективного управління лісовими ресурсами продиктована глобальними екологічними викликами, серед яких найбільш критичними є кліматичні зміни, неконтрольоване вирубування лісів та зростання інтенсивності природних катаклізмів. Попри існування різноманітних технологічних інструментів для дистанційного моніторингу лісових ресурсів, їх практичне застосування в діяльності лісогосподарських підприємств залишається обмеженим через низку суттєвих недоліків. Основною ознакою неефективності існуючих моніторингових систем є їх неспроможність до повноцінного узагальнення великої кількості різнорідних даних. Сучасні програмні комплекси часто функціонують як ізольовані модулі, що перешкоджає створенню єдиного інформаційного простору, де б поєднувалися мультиспектральні супутникові знімки, результати оперативного зондування з БПЛА, дані стаціонарних наземних пунктів спостереження та ретроспективна інформація з архівних баз даних. Така фрагментарність унеможливує формування цілісної картини стану екосистем загалом та лісових ресурсів зокрема.

Також існуюче програмне забезпечення часто обмежується простою фіксацією поточного стану природних ресурсів, в ньому практично відсутні компоненти для глибокого аналізу даних та моделювання можливих сценаріїв розвитку процесів чи прогнозування ризиків.

Додатковими перешкодами для широкого впровадження автоматизованих засобів моніторингу та аналізу лісових ресурсів є надмірна вартість ліцензійного програмного забезпечення, складність архітектури, що потребує специфічних технічних навичок від персоналу, відсутність повноцінної підтримки мобільних пристроїв для роботи в польових умовах. Тому критично важливим є розроблення та наукове обґрунтування нової вебплатформи, яка зможе подолати ці обмеження і стане універсальним інструментом для ведення сталого та цифровізованого лісового господарства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основою раціонального лісокористування є систематичне спостереження та оцінка стану лісових масивів. Якщо раніше переважали методи наземного моніторингу, зокрема, натурна таксація та безпосередні польові вишукування, то сучасний технологічний прогрес зумовив перехід до дистанційних методів спостереження. Новітні технології дозволяють здійснювати високоточний моніторинг великих територій, значно мінімізуючи вплив людського фактору та оптимізуючи трудовитрати.

Метод дистанційного зондування землі заснований на отриманні та опрацюванні мультиспектральних даних із космічних апаратів. Використання відкритих платформ, таких як Landsat та Sentinel [6], або високоточних комерційних сервісів (наприклад, Planet), відкриває можливості для безперервного ретроспективного аналізу стану лісового покриву. ДЗЗ є незамінним інструментом для фіксації незаконних рубок у важкодоступних районах, моніторингу біологічних процесів, оцінки масштабів збитків після стихійних лих – пожеж, вітровалів чи паводків, інвентаризації лісових ресурсів [9].

Використання геоінформаційних систем у моніторингу лісових ресурсів дозволяє створювати багатопланові інтерактивні моделі, де просторові дані про рельєф, гідрографію та дорожню мережу інтегруються з детальною таксаційною інформацією про склад і вік лісових насаджень. Завдяки функціоналу картографування та аналізу часових рядів ГІС дозволяє здійснювати безперервний контроль за динамікою лісового покриву [4], оперативно виявляти незаконні рубки, втрати лісового покриву [1, 5], моделювати сценарії поширення пожеж на основі топографічних факторів та планувати заходи з лісовідновлення з максимальною точністю.

Технологія лазерного сканування LiDAR дозволила перейти на якісно новий рівень при виконанні завдань лісової таксації та екологічного моніторингу. Назвину від традиційного аерофотознімання або супутникових знімків, які дають переважно двовимірне зображення лісового пологугу, LiDAR дозволяє визначати біометричні параметри лісу: висоту дерев, запаси біомаси та деревини, аналізувати структуру підліску, оцінювати стан молодняка та чагарників, моделювати рельєф під деревами, що неможливо зробити за допомогою традиційних даних ДЗЗ [8]. Також LiDAR допомагає ідентифікувати мікросередовища проживання тварин, оцінювати пожежну небезпеку (визначаючи кількість сухої деревини на землі) та планувати лісозаготівлі з мінімальною шкодою для ландшафту.

Дані, які зібрані з різних джерел під час моніторингу, потребують обробки та аналізу за допомогою сучасного математичного апарату. Ключовими напрямками при цьому є:

– математично-статистичне моделювання – підхід, орієнтований на кількісну оцінку динамічних процесів у лісових екосистемах. Використання методів статистичного аналізу дозволяє не лише констатувати факти змін, а й верифікувати їх достовірність. Зокрема, аналіз часових рядів застосовується для виявлення довгострокових трендів приросту біомаси або скорочення лісистості, що дозволяє відділити природні циклічні коливання від антропогенного впливу. Кореляційний та регресійний аналіз забезпечує можливість встановлення стійких зв'язків між станом лісових насаджень та температурними режимами, рівнем опадів чи ґрунтових вод. Побудова регресійних моделей дозволяє прогнозувати динаміку здоров'я лісу на 5–10 років вперед при різних сценаріях зміни клімату [10];

– машинне навчання та інтелектуальний аналіз. Впровадження алгоритмів штучного інтелекту забезпечує автоматизацію розпізнавання об'єктів на знімках високої роздільної здатності, одержаних при дистанційному зондуванні землі. Використання нейронних мереж дозволяє автоматично ідентифікувати видовий склад лісу, розділяючи хвойні, листяні та мішані ділянки з точністю понад 90%. Також алгоритми машинного навчання здатні виявляти аномальні стани на початковому етапі (ураження шкідниками чи хворобами) та прогнозувати майбутні ризики для лісових ресурсів [7];

– геопросторовий аналіз є незамінним для операційного планування та оцінки ризиків на ландшафтному рівні. Він використовується для районування територій за ступенем пожежної небезпеки (наприклад, на основі відстані від доріг, населених пунктів та джерел води). Геостатистична інтерполяція дозволяє створювати карти стану лісу на основі точкових наземних спостережень, заповнюючи «інформаційні прогалини» між обстеженими ділянками. Просторова аналітика допомагає точно визначити межі охоронних зон, планувати оптимальні маршрути для лісогосподарської техніки та визначити пріоритетні зони для лісовідновлення або потенційно небезпечні ділянки можливих зсувів з урахуванням рельєфу та експозиції схилів [2].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є обґрунтування концепції та розроблення багатофункціональної системи для автоматизованого моніторингу лісових ресурсів, що дозволить підвищити ефективність управління та оперативність прийняття рішень в лісовому господарстві.

Викладення основного матеріалу дослідження

Створення вебплатформи для моніторингу та аналізу лісових ресурсів передбачає об'єднання традиційних і сучасних методів збору та обробки даних в єдину автоматизовану систему, яка буде зручною та доступною для користувачів. Основними параметрами майбутньої вебплатформи є:

– автоматизація збору даних. Процес збору інформації переходить від трудо- та часовитратних польових виїздів до безперервного потокового моніторингу. Платформа може бути підключена до API супутникових систем дистанційного зондування землі (Sentinel, Landsat), що дозволяє отримувати оновлені мультиспектральні знімки щоразу, коли супутник проходить над заданою територією, усуваючи необхідність їх ручного завантаження та попередньої обробки. Така система повинна бути архітектурно розрахована на поєднання векторних карт лісництв, растрових супутникових даних та хмар точок LiDAR;

– обробка та аналіз даних. Для аналізу терабайтів інформації, що включає просторові дані високої роздільної здатності, можуть бути використані хмарні обчислення (AWS, Google Cloud, Azure), що забезпечуватиме швидку обробку великих обсягів інформації, включаючи супутникові знімки, дані LiDAR та результати польових досліджень;

– візуалізація – розроблення інтерактивних інструментів, таких як карти, графіки, дашборди та віртуальні моделі лісових ділянок, де можна візуально оцінити, наприклад, наслідки планових вирубок або змодельовати поширення пожеж, дозволяє користувачам легко інтерпретувати дані та приймати обґрунтовані рішення.

Загалом, моніторинг лісових ресурсів сьогодні є багатограним комплексом процесів, де кожен метод компенсує недоліки іншого: традиційна таксація надає «сталонні» дані для калібрування математичних моделей, дистанційне зондування забезпечує охоплення територій, машинне навчання автоматично виявляє деградації чи наслідки незаконної діяльності. Інтеграція цих підходів у межах єдиної вебплатформи забезпечуватиме максимальну оперативність реагування. В умовах глобальних викликів – від кліматичних змін до антропогенних впливів – така система стає критично важливим інструментом для забезпечення екологічної безпеки та економічної прозорості ведення лісового господарства.

В процесі розроблення вебплатформи для моніторингу лісових ресурсів важливим етапом є аналіз існуючих програмних рішень, що вже використовуються у цій галузі. Зокрема, було проаналізовано таке програмне забезпечення: AFRY Smart Forestry Manager, FOVEA Forest Management System, Remsoft Operations, «Управління лісовим господарством». За результатами проведеного аналізу можна виділити такі основні недоліки [3].

1. Більшість сучасних систем не здатні ефективно об'єднувати дані з різних джерел і, як наслідок, відсутність інтегрованого підходу знижує точність прогнозів та ускладнює прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

2. Дані не оновлюються в реальному часі, що є критичним для оперативного реагування на такі події, як лісові пожежі, спалахи хвороб або незаконна вирубка та інші ситуації, що вимагають швидкого втручання.

3. Програмне забезпечення має складний інтерфейс, що потребує спеціальних технічних знань для роботи з ним.

4. Наявність в продукті лише базових аналітичних функцій, що не забезпечує глибокого аналізу даних (прогнозування тенденцій, моделювання сценаріїв або виявлення аномалій).

5. Висока вартість програмних продуктів, що робить їх недоступними для малих і середніх лісових господарств.

6. Обмежені можливості для ефективною обробки великих обсягів даних та для забезпечення достатнього рівня захисту конфіденційної інформації.

7. Відсутність стандартизованих API або протоколів обміну даними ускладнює інтеграцію існуючих платформ з іншими інструментами управління лісами, екологічними системами чи урядовими базами даних.

8. Не всі платформи оптимізовані для роботи на мобільних пристроях, що ускладнює роботу в польових умовах.

Розроблення вебплатформи для автоматизованого моніторингу та аналізу лісових ресурсів вимагає глибокого розуміння їх особливостей, а також специфіки методів і підходів до моніторингу. Можна виділити такі основні характеристики об'єкта моніторингу:

- просторова неоднорідність – різний видовий склад і структура лісів залежно від регіону вимагає адаптації методів моніторингу до різних типів лісів. При цьому вимогою до програмного забезпечення є підтримка аналізу для різних типів лісів та гнучка географічна прив'язка;
- динамічність – постійні зміни через природні та антропогенні фактори передбачають їх відстеження в реальному часі та необхідність ретроспективного аналізу;
- багатокomпонентність – наявність дерев, підліску, ґрунтів, фауни як взаємопов'язаних елементів вимагає комплексного підходу до збору, аналізу даних про всі ці компоненти та їх інтеграції;
- вразливість до зовнішніх факторів – чутливість до кліматичних та антропогенних факторів впливу вимагає наявності модулів прогнозування та раннього попередження;
- економічна та екологічна цінність – потребує функції обліку ресурсів для економічного планування та екологічного збереження [3].

Всі ці характеристики впливатимуть на дизайн і функціонал вебплатформи.

Моніторинг лісових ресурсів – це систематичний процес, спрямований на збір, обробку та аналіз даних про їхній стан і зміни. Він також має свої особливості, які необхідно врахувати при розробленні вебплатформи, а саме:

- великі обсяги даних;
- точність та актуальність;
- сезонність та циклічність;
- доступність у польових умовах [3].

Для створення вебплатформи необхідна чітко структурована система програмних модулів і вибір відповідних інструментів для обробки даних. До складу платформи входять кілька взаємопов'язаних модулів: модуль збору даних, модуль обробки даних, модуль управління користувачами. Модульна структура забезпечує простоту розробки, легкість у підтримці та можливість подальшого розширення. Взаємодія модулів відбувається природно та інтуїтивно: дані від користувачів потрапляють у базу через перший модуль, обробляються та аналізуються у другому, а третій модуль забезпечує безпеку та персоналізацію роботи. Така архітектура допомагає лісовому господарству автоматизувати рутинні процеси, зменшити кількість помилок при обліку ресурсів та покращити координацію робіт на різних ділянках.

Головною функціональною метою вебплатформи є централізований збір, обробка та візуалізація даних про лісові ділянки, ресурси та виробничі операції з використанням сучасних геоінформаційних технологій. Програмне забезпечення надає користувачам можливість ефективно управляти інформацією щодо стану лісових масивів, контролювати виконання планових завдань та приймати обґрунтовані управлінські рішення на основі достовірних даних.

Функціональні вимоги до системи включають:

- реєстрацію та ведення обліку лісових ділянок з детальним описом параметрів (географічне положення, площа, тип лісу);
- планування лісгосподарських робіт з розподілом завдань та контролем їх виконання;
- обробку інформації про наявні природні ресурси, включно з видами деревини, їх кількістю та якістю;
- інтеграцію з геоінформаційними системами для візуального відображення лісових територій на карті;
- генерацію звітів та аналітичних даних для прийняття рішень [3].

За результатами виконаних досліджень було спроектовано вебдодаток, який являє собою інтегровану систему управління лісовим господарством, що забезпечує комплексний облік та планування лісгосподарської діяльності. Основним призначенням системи є автоматизація процесів обліку лісових ресурсів, управління ділянками лісу, планування робіт та контроль за виконанням завдань з використанням геоінформаційних технологій. Система спрямована на підвищення ефективності управління лісовими ресурсами шляхом централізованого збору, обробки та візуалізації даних про стан лісових ділянок, наявні ресурси та виробничі процеси. На відміну від аналогічних систем, розроблений вебдодаток має ряд суттєвих відмінностей:

- інтеграція геопросторових даних з управлінням ресурсами – система поєднує в собі функціонал картографування лісових ділянок з модулями обліку інвентарю та управління завданнями, забезпечуючи цілісний підхід до лісгосподарського планування;
- відстеження техніки у реальному часі – впроваджено функціонал моніторингу розташування лісгосподарської техніки на карті з можливістю візуального розмежування ділянок та обладнання, що підвищує ефективність логістики та операційного планування;
- гнучка система обліку ресурсів – реалізовано детальний облік лісових ресурсів з прив'язкою до конкретних ділянок, що дозволяє проводити більш точний аналіз продуктивності та планування заготівельних робіт;

– інтегроване управління завданнями – система включає функціонал для призначення та контролю виконання робіт з прив’язкою до конкретних працівників та ділянок, забезпечуючи можливість відстеження виробничих процесів лісового господарства [3].

Висновки

В результаті проведеного дослідження було розв’язане важливе науково-практичне завдання щодо створення ефективного інструментарію для моніторингу та аналізу лісових ресурсів. Основні результати роботи дозволяють зробити такі висновки:

1. Аналіз існуючого програмного забезпечення показав, що головними перешкодами для ефективного управління лісами є фрагментарність даних, відсутність інтеграції між супутниковими та наземними методами, а також висока вартість рішень, що обмежує їх впровадження в малих і середніх господарствах.

2. Доведено, що максимальна ефективність моніторингу досягається лише через поєднання методів: традиційної таксації (як еталона), дистанційного зондування Землі (для охоплення територій) та технології LiDAR (для отримання 3D-структури лісу). Така інтеграція дозволяє нівелювати недоліки окремих підходів.

3. Спроектовано вебдодаток, який вирізняється модульною структурою, що забезпечує гнучкість та масштабованість. Впровадження хмарних обчислень дозволяє обробляти великі масиви даних у реальному часі, що є критичним для оперативного реагування на незаконні вирубки та природні катастрофи.

4. Запропонований вебдодаток поєднує в собі не лише аналітичні функції, а й інструменти операційного менеджменту: відстеження техніки в реальному часі, гнучкий облік ресурсів та систему управління персоналізованими завданнями.

5. Створена система є ефективним інструментом для переходу до моделі сталого лісокористування. Вона забезпечує прозорість виробничих процесів, підвищує точність прогнозування стану екосистем та створює підґрунтя для побудови національних «цифрових двійників» лісових масивів.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів машинного навчання для автоматичного розпізнавання видів дерев та інтеграцію платформи з державними реєстрами для повної автоматизації документообігу в лісовій галузі.

Список використаної літератури

1. Горелік С., Сол-Хоз Д., Сич Р. Методологія оцінки втрат лісів із використанням ГІС-технологій. Український журнал дистанційного зондування, 10 (2), 2023. С. 19–26. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.2.237>

2. Кравець О. Я. Використання геоінформаційних технологій при дослідженні зсувних процесів, Науковий вісник НЛТУ України, 30 (2), 2020. С. 113–117. <https://doi.org/10.36930/40300220>

3. Кравець О., Незамай Б., Гарматюк В. Розроблення вимог та програмного забезпечення для моніторингу лісових ресурсів. // Міжнародна конференція “Land Unity Summit – 2025” 11-12 вересня 2025, Івано-Франківськ. С. 44-46.

4. Кульбанська І. М. Моніторинг змін площ лісового покриву Покутсько-Буковинських Карпат засобами геоінформаційних технологій. Науковий вісник НЛТУ України, 34 (5), 2024. С. 23-28. <https://doi.org/10.36930/40340503>

5. Часковський О. Г., Гриник Г. Г. Оцінювання втрат лісового покриву Українських Карпат дистанційними методами за матеріалами відкритих джерел супутникової інформації. Науковий вісник НЛТУ України, 30 (1), 2020. С. 66-73. <https://doi.org/10.36930/40300111>

6. Banskota A., Kayastha N., Falkowski M. J., Wulder M. A., Froese R. E., White J. C. Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review. Canadian Journal of Remote Sensing, 40(5), 2014. P. 362–384. <https://doi.org/10.1080/07038992.2014.987376>

7. Gavilán-Acuña G., Olmedo G. F., Mena-Quijada P., Guevara M., Barria-Knopf B., Watt M. S. Reducing the Uncertainty of Radiata Pine Site Index Maps Using an Spatial Ensemble of Machine Learning Models. Forests, 12(1), 2021. P. 77. <https://doi.org/10.3390/f12010077>

8. Chen Z., Lin Z., Shi T., Deng D., Chen Y., Pan X., Chen X., Wu T., Lei J., Li Y. Advancing Forest Inventory in Tropical Rainforests: A Multi-Source LiDAR Approach for Accurate 3D Tree Modeling and Volume Estimation. Remote Sens., 17, 2025. P. 3030. <https://doi.org/10.3390/rs17173030>

9. Goodbody T. R., Coops N. C., White J. C. Digital aerial photogrammetry for updating area-based forest inventories: A review of opportunities, challenges, and future directions. Current Forestry Reports, 5, 2019. P. 55–75. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2>

10. Pretzsch H., Biber P., Schütze G. et al. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. Nat Commun 5, 4967, 2014. <https://doi.org/10.1038/ncomms5967>

References

1. Horelyk, S., Saul-Hoze, D., & Sych, R. (2023). Methodology for determining forest losses using GIS technologies. Ukrainian journal of remote sensing, 10(2), 19–26. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.2.237>

2. Kravets, O. Ya. (2020). Vykorystannia heoinformatsiinykh tekhnolohii dlia doslidzhennia zsvnykh protsesiv [Use of geoinformation technologies for the study of landslide processes]. Scientific Bulletin of UNFU, 30(2), 113-117. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.36930/40300220>
3. Kravets, O., Nezamai, B., & Harmatiuk, V. (2025). Rozroblennia vymoh ta prohramnoho zabezpechennia dlia monitorynhu lisovykh resursiv [Development of requirements and software for forest resource monitoring]. Proceedings of the International Conference “Land Unity Summit – 2025”, September 11-12, 2025, 44-46. Ivano-Frankivsk, Ukraine. [in Ukrainian]
4. Kulbanska, I. M. (2024). Monitoring of changes in the forest cover area of the Pokuttia-Bukovyna Carpathians using geoinformation technologies. Scientific Bulletin of UNFU, 34(5), 23-28. <https://doi.org/10.36930/40340503>
5. Chaskovskyy, O. H., & Hrynyk, H. H. (2020). Estimation of losses of forest cover of the Ukrainian Carpathians by remote methods based on the materials of open sources of satellite information. Scientific Bulletin of UNFU, 30(1), 66–73. <https://doi.org/10.36930/40300111>
6. Banskota, A., Kayastha, N., Falkowski, M. J., Wulder, M. A., Froese, R. E., & White, J. C. (2014). Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review. Canadian Journal of Remote Sensing, 40(5), 362–384. <https://doi.org/10.1080/07038992.2014.987376>
7. Gavilán-Acuña, G., Olmedo, G. F., Mena-Quijada, P., Guevara, M., Barría-Knopf, B., & Watt, M. S. (2021). Reducing the Uncertainty of Radiata Pine Site Index Maps Using an Spatial Ensemble of Machine Learning Models. Forests, 12(1), 77. <https://doi.org/10.3390/f12010077>
8. Chen, Z.; Lin, Z.; Shi, T.; Deng, D.; Chen, Y.; Pan, X.; Chen, X.; Wu, T.; Lei, J.; Li, Y. Advancing Forest Inventory in Tropical Rainforests: A Multi-Source LiDAR Approach for Accurate 3D Tree Modeling and Volume Estimation. Remote Sens. 2025, 17, 3030. <https://doi.org/10.3390/rs17173030>
9. Goodbody, T. R., Coops, N. C., & White, J. C. (2019). Digital aerial photogrammetry for updating area-based forest inventories: A review of opportunities, challenges, and future directions. Current Forestry Reports, 5, 55–75. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2>
10. Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G. et al. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. Nat Commun 5, 4967 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms5967>

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026