

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА УСТАНОВА «НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ»

На правах рукопису

СЕМКО ІГОР ДМИТРОВИЧ

УДК 528.8.044.6:630*5

**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ НАДЗЕМНОЇ ФІТОМАСИ ДЕРЕВОСТАНУ
СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ НА ОСНОВІ МАТЕРІАЛІВ АВІАЦІЙНОЇ
ЛІДАРНОЇ ЗЙОМКИ**

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
д. т. н., професор
Попов Михайло
Олексійович

Київ – 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ЗАДАЧА ВИВЧЕННЯ БІОЛОГІЧНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ДЕРЕВОСТАНІВ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ НА ДОСЛІДЖЕННЯ	11
1.1. Основні поняття в лісовій таксації	13
1.2. Сучасні методи визначення надземної фітомаси деревостанів	18
1.2.1. Оцінка компонентів фітомаси деревостанів та дерев наземним методом	18
1.2.2. Основні передумови застосування дистанційних методів та засобів для оцінки фітомаси деревостанів	19
1.2.3. Принцип авіаційної лідарної зйомки	22
1.2.4. Застосування авіаційного лідара для визначення надземної фітомаси	27
1.3. Алометричні рівняння для розрахунку обсягів надземної фітомаси	30
1.4. Постановка завдання на дослідження	35
Висновки до розділу	38
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИЧНИЙ АПАРАТ ПРИКЛАДНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ЛІДАРНИХ ДАНИХ	39
2.1. Особливості представлення геопросторових об'єктів при обробленні лідарних даних	39
2.2. Основні підходи та алгоритми для обробки лідарних даних	48
2.2.1. Об'єктно-орієнтований підхід	48
2.2.2. Методи, засновані на кластеризації	50
2.2.3. Перетворення вододілу	50
2.2.4. Підходи, засновані на моделюванні вокセルів	51
2.3. Статистичні параметри для визначення надземної фітомаси деревостанів з використанням лідарних даних	53
Висновки до розділу	56

РОЗДІЛ 3 МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАДЗЕМНОЇ ФІТОМАСИ ЗА ДАНИМИ АВІАЦІЙНОГО ЛІДАРНОГО ЗНІМАННЯ	57
3.1. Схема методу визначення надземної фітомаси за даними авіаційної лідарної зйомки	57
3.2. Територія дослідження та проведення польових робіт	59
3.3. Попередній аналіз і оброблення лідарних даних	65
3.4. Порівняльний аналіз методів виділення окремих дерев у деревостані на основі аналізу даних авіаційної лідарної зйомки	68
Висновки до розділу	83
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕРЕВОСТАНУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАДЗЕМНОЇ ФІТОМАСИ ЗА ДАНИМИ АВІАЦІЙНОЇ ЛІДАРНОЇ ЗЙОМКИ	84
4.1. Отримання параметрів деревостану на основі вокセルного аналізу	84
4.1.1. Моделювання вокселів з лідарних даних	84
4.1.2. Метод автоматизованого виокремлення дерев за допомогою вокセルного аналізу	87
4.1.3. Метод розрахунку об'ємних показників крони на основі вокセルного аналізу	89
4.2. Метод оцінювання індексу листкової поверхні	91
4.3. Метод розрахунку діаметра стовбура на висоті грудей	98
4.4. Результати розрахунку надземної фітомаси	110
4.5. Інтегральна оцінка точності розробленого методу визначення надземної фітомаси за даними авіаційної лідарної зйомки	112
Висновки до розділу	114
ВИСНОВКИ	114
ЛІТЕРАТУРА	118
ДОДАТКИ	131

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

2,5D	– два з половиною вимірний
2D	– двовимірний
3D	– тривимірний
ASPRS	– American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Американське товариство з фотограмметрії та дистанційного зондування)
DEM	– Digital Elevation Model (цифрова модель поверхні)
DBH	– Diameter at Breast Height (діаметр на висоті грудей)
FAE	– False Alarm Error (помилкова тривога)
HME	– Height Measurement Error (помилка визначення висоти)
LAI	– Leaf Area Index (індекс листкової поверхні)
LiDAR	– Light Detection And Ranging (лідар)
LPI	– Laser Penetration Index (індекс проникнення лазерного випромінювання)
RMSE	– Root Mean Square Error (середньоквадратичне відхилення)
TLE	– Target Location Error (помилка місцезнаходження)
TLS	– Terrestrial Laser Scanning (наземне лазерне сканування)
TIN	– Triangulated Irregular Network (нерегулярна триангуляційна мережа)
АЛЗ	– Авіаційне лідарне знімання
ГІС	– географічна інформаційна система
ДЗЗ	– дистанційне зондування Землі
ЛД	– лідарні дані
ЛК	– лісовий кодекс
нЦММ	– нормалізована цифрова модель місцевості
ЦММ	– цифрова модель місцевості
ЦМР	– цифрова модель рельєфу

ВСТУП

Актуальність теми. Ліси – компонент біосфери, якому притаманні унікальні утворюючі, водозахисні, ґрунтозахисні та інші системні функції. Ліси відіграють величезну роль в процесі стабілізації екологічного стану регіонів, локалізації токсикантів, збереженні водного балансу тощо. Вони забезпечують збереження у зв'язаному стані значної частки світових запасів вуглецю та виступають як екологічний каркас збереження біорізноманіття екосистем.

Важливою складовою біологічної продуктивності лісових насаджень є фітомаса деревостану, компонентами якої здійснюються поглинання та довготермінове депонування вуглецю і генерування кисню.

В останні роки для визначення фітомаси лісів все ширше застосовують методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Зображення, що формуються шляхом аерокосмічного знімання Землі, здатні надавати об'єктивну інформацію про запаси і динаміку фітомаси. Така інформація сприяє одержанню більш точних оцінок фітомаси, а в ряді випадків метод ДЗЗ може бути альтернативою наземним методам.

Однак двовимірні зображення, які формуються більшістю сучасних видових технічних засобів ДЗЗ, роблять дуже складним процес отримання оцінок розподілу характеристик і параметрів лісових об'єктів вздовж третьої просторової координати – висоти, що негативно відображається на точності оцінювання біологічної продуктивності лісових насаджень. Між тим, сьогодні відомі лідарні системи, як повітряного базування, так й наземні, які дозволяють з високою точністю формувати тривимірні моделі місцевості та розташованих на ній об'єктів.

Дисертаційна робота присвячена розробці методу оцінки фітомаси деревостанів сосни звичайної (*Pinus sylvestris L.*), поширеної на Поліссі та північній частині Лісостепу, за даними авіаційної лідарної зйомки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відповідності з планом наукових досліджень ДУ «Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» у рамках наступних тем:

- “Методи дистанційного оцінювання біофізичних параметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів в межах різних ландшафтно-кліматичних зон території України” (Державний реєстраційний номер 0114U001664).
- “Оцінювання характеристик рослинних об'єктів на основі комплексування даних спектрополяризаційних вимірювань і матеріалів аерокосмічних зйомок” (Державний реєстраційний номер 0113U004491).
- “Розробка нових методик моніторингу земних покривів (рослинність, ґрунти, водні ресурси), біорізноманіття в умовах кліматичних змін з метою управління ризиками надзвичайних ситуацій” (Державний реєстраційний номер 0112U000703).
- “Методологія комплексного геоінформаційного аналізу матеріалів аерокосмічних спостережень Землі і наземних даних в інтересах підвищення ефективності природокористування” (Державний реєстраційний номер 0111U000030).

Мета і задачі дослідження. *Мета роботи* – підвищення оперативності і точності визначення фітомаси деревостанів сосни звичайної на основі матеріалів авіаційної лідарної зйомки.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- аналіз існуючих методів визначення фітомаси;
- визначення таксаційних характеристик деревостану на основі матеріалів авіаційної лідарної зйомки;
- виявлення характеру залежностей між таксаційними та дистанційними даними;

- розробка методу визначення фітомаси деревостанів за даними авіаційної лідарної зйомки;
- створення допоміжних методів, які забезпечують обчислювально-алгоритмічну реалізацію розробленого методу визначення фітомаси деревостанів;
- перевірка точності розробленого методу визначення фітомаси деревостанів та формування рекомендацій щодо його практичного використання.

Методи дослідження. Для вирішення сформульованих завдань у процесі досліджень застосовувалися як загальнонаукові, так і прикладні методи, зокрема:

- методи математичної статистики та регресійного аналізу (для виявлення наявності та ступеня зв'язків між таксаційними та дистанційними характеристиками деревостану);
- методи математичної морфології (для аналізу растрових похідних, утворених з лідарних даних);
- методи геоінформаційного аналізу (для отримання кількісних показників деревостану та оцінювання надземної фітомаси).

Об'єкт дослідження: фітомаса деревостанів сосни звичайної.

Предмет дослідження: методи визначення фітомаси деревостанів сосни звичайної.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- розроблено метод визначення надземної фітомаси деревостану сосни звичайної на основі матеріалів авіаційної лідарної зйомки;
- запропоновано метод автоматизованого виділення дерев з використанням вокセルного підходу;
- розроблено метод розрахунку об'ємних показників крони на основі вокセルного аналізу;

- запропоновано метод розрахунку діаметра стовбура на висоті грудей на основі використання лідарних даних, в основі якого лежить рівняння множинної регресії;
- уdosконалено методи виділення дерев шляхом комплексування результатів, отриманих при використанні 2,5D та 3D підходів;
- адаптовано метод оцінювання індексу листкової поверхні за даними лідара, в основі якого лежить рівняння множинної регресії.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів.

Обґрунтованість одержаних результатів досягається використанням геоінформаційних методів та сучасних методів статистичного аналізу, а також валідацією розроблених методів. Валідація розроблених методів проводилась на базі ділянки лісу на території лісництва Мартев надлісництва Тучно Західнопоморського воєводства Польщі спільно з співробітниками факультету математики, інформаційних технологій та ландшафтної архітектури Католицького університету ім. Іона Павла II (м. Люблін, Польща).

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці методу оцінки фітомаси деревостанів сосни звичайної та адаптації дистанційних методів оцінки фітомаси до наземних шляхом обчислення таксаційних характеристик, потрібних для розрахунку надземної фітомаси. Розроблений метод може бути використаний як інструмент підтримки управлінських рішень в лісогосподарських, лісовпорядкувальних, ресурсознавчих і екологічних задачах у системі Державного комітету лісового господарства та в інших відомствах і установах України.

Розроблений метод спрямований на підвищення оперативності і точності визначення фітомаси деревостанів сосни звичайної на великих територіях. Запропонований метод може застосовуватись як самостійно, так і

як доповнення при таксаційному оцінюванню фітомаси дерев та деревостанів сосни звичайної.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійним науковим дослідженням автора, основні результати якого викладені у роботах [1-15]. У спільних роботах автором обґрунтовано і розроблено метод оцінювання характеристик зелених насаджень на урбанізованих територіях з використанням засобів ДЗЗ [1]; розроблено метод оцінювання індексу листкової поверхні за даними авіаційної лідарної зйомки [2, 4]; проведено порівняльний аналіз методів автоматизованого виділення окремих дерев у лісовому масиві за даними лідарного знімання [3]; розроблено метод оцінки біомаси деревостану на основі морфоструктурних показників деревостану, отриманих з лідарних даних [5].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідалися на таких конференціях:

1. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Екологічна безпека держави» (м. Київ, 2013 р.).
2. Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених» (м. Кіровоград, 2014 р.).
3. Міжнародна науково-практична конференція «Інтеграція геопросторових даних у дослідженнях природних ресурсів» (м. Київ, 2014 р.).
4. Четверта всеукраїнська конференція «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2014» (м. Київ, 2014 р.).
5. Міжнародна науково-практична конференція «Краєвид з комп'ютера» (м. Білосток, Польща, 2014 р.).
6. П'ятнадцята міжнародна екологічна конференція «Екологічна і туристична ситуація північної частини Карпатського Єврорегіону» (м. Бжозув, Польща, 2014 р.).

7. Науково-практична конференція «Яри і сухі долини в Любліні – потенціал та ризики» (м. Люблін, Польща, 2014 р.).

8. Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених» (м. Житомир, 2015 р.).

Публікації. За темою дисертаційних досліджень опубліковано 15 наукових праць, у тому числі 6 статей (з яких: 3 – у фахових наукових виданнях України, 3 – у періодичних наукових виданнях Польщі) та 9 тез доповідей у збірниках матеріалів вітчизняних і закордонних наукових конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Робота викладена на 135 сторінках, що містять 115 сторінок основного тексту, 39 рисунків, 10 таблиць і 4 додатки. Список використаних джерел налічує 110 найменувань на 13 сторінках.

Подяки. Дисертант вдячний співавторам за плідну співпрацю та підтримку у підготовці даної роботи, особливо проф. Ігорю Козаку (Dr hab. Ihor Kozak, Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II, Polska) за консультативну допомогу та поради з питань лісової таксації.

Автор також виражає вдячність Петру Коцюбі, Анджею Венглю та Павлу Стшелінському за надання даних лідарної зйомки та інших інформаційних матеріалів. А також к. г. н. Віктору Путренку (НТТУ «КПІ»), проф. Михайлу Говорову (prof. Michael Govorov, Vancouver Island University, Canada) та проф. Дейву Кейку (prof. David Cake, Vancouver Island University, Canada) за надання навчальної ліцензії програмного продукту ArcGIS 10.2, що була отримана в рамках освітнього проекту “Інфраструктура геопросторових даних України” за підтримки Міністерства закордонних справ, торгівлі та розвитку Канади та Ванкуверського Острівного Університету.

РОЗДІЛ 1

ЗАДАЧА ВИВЧЕННЯ БІОЛОГІЧНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ДЕРЕВОСТАНІВ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ НА ДОСЛІДЖЕННЯ

Сьогодні, як ніколи раніше, зрозуміло, що екологічна та техногенна безпека України напряму залежить від стану лісових насаджень. Дійсно, ліси відіграють величезну роль в процесі стабілізації екологічного стану регіонів, локалізації токсикантів, збереженні водного балансу тощо. Вони забезпечують збереження у зв'язаному стані значної частки світових запасів вуглецю та виступають як екологічний каркас збереження біорізноманіття екосистем, а також виконують багато інших біосферних функцій. Тому моніторинг стану лісів, проведення об'єктивних та оперативних їх оцінок необхідні для контролю за сталим розвитком територій.

Потреба здійснення регулярної оцінки стану лісів зумовлена їх безперервною динамікою через вплив природних й антропогенних чинників (пожежі, урагани, вирубки, техногенне забруднення та ін.) для інформаційного забезпечення прийняття управлінських рішень щодо раціональних способів лісокористування.

Про важливість проблеми свідчать законодавчі акти та програмні документи, прийняті Верховною Радою та Кабінетом Міністрів України стосовно збереження і нагляду за лісами та запобігання несанкціонованих вирубок. Постанова Кабінету Міністрів України № 391 від 30 березня 1998 р. про затвердження «Положення про державну систему моніторингу довкілля» [16]. Постанова Кабінету Міністрів України № 977 від 16 вересня 2009 р. про затвердження Державної цільової програми "Ліси України на 2010-2015 роки" [17].

Пріоритетними напрямками Національної лісової стратегії проголошено [18]:

- перевагу природоохоронного значення та необхідність раціонального використання лісових ресурсів;

- підвищення продуктивності та покращання породного складу лісових насаджень;
- підвищення стійкості лісових екосистем до негативних чинників, спричинених антропогенними порушеннями та глобальними змінами клімату.

Особливу увагу надано вживанню заходів з лісовідновлення, збалансованого лісокористування, створення полезахисних смуг та захисних насаджень для запобігання ерозії ґрунтів, захисту лісів від пожеж, шкідників та захворювань. Лісозаготівлю потрібно здійснювати на принципах тривалого та раціонального використання лісових ресурсів, відновлення цінних лісових порід, виконання санітарних вирубок та розчищення лісу.

Лісове господарство України ведеться на підставі лісового кодексу (ЛК), прийнятого в 1994 р., а також з урахуванням інших нормативно-правових документів [19].

Ведення державного обліку лісів на території України здійснюється відповідно до ст. 49 ЛК України з метою ефективної організації охорони і захисту лісів, раціонального використання лісового фонду України, відтворення лісів, здійснення систематичного контролю за якісними та кількісними змінами лісів.

Згідно зі ст. 51 ЛК України, Порядком ведення державного обліку лісів, затвердженим постановою Кабінету міністрів України від 27 вересня 1995 р., Інструкцією про порядок ведення державного лісового кадастру і первинного обліку лісів, затвердженою наказом Мінлісгоспу України від 15 листопада 1995 р., державний ЛК включає: облік якісного та кількісного стану лісового фонду України; поділ лісів на категорії залежно від основних виконуваних ними функцій; грошову оцінку лісів; інші показники.

Успішне розв'язання цих завдань можливе на основі впровадження нових методів отримання інформації про стан та динаміку змін лісових ресурсів, подальшого вдосконалення лісового моніторингу, методів прогнозу змін та забезпечення ефективного лісокористування.

1.1. Основні поняття в лісовій таксації

Визначення багатьох характеристик якісного та кількісного стану лісів в Україні реалізується під час проведення таксаційних робіт. *Таксація лісу* (від лат. *Taxatio* – оцінка) – облік лісу, його всебічна матеріальна оцінка та складання технічної характеристики деревостану, визначення його віку, запасу (кількості) деревини, приросту і об'єму окремих дерев та їх частин тощо. Матеріали таксації служать основою для інвентаризації лісу, складання проектів організацій і ведення лісового господарства.

Лісівниками напрацьована велика методологічна база з визначення таксаційних характеристик насадження. Самі характеристики та вимоги до лісовпорядкувальних робіт закріплені на рівні нормативно-правових актів України [20]. Нижче наведено основні терміни, які сформульовані в цих документах і якими ми будемо далі користуватися у дисертаційній роботі.

Лісове насадження, або лісостан як основний природний компонент лісу – це утворення на певній ділянці лісу, яке характеризується однорідністю деревної і чагарникової рослинності, живого наземного покриву, умов місцевростання та взаємовідносин між ними. Однією з основних складових частин лісового насадження є деревостан.

Древостан – це сукупність лише деревної рослинності (деревних порід) на певній ділянці лісу, що має однорідний склад порід, походження, вік, форму (ярусність), густоту тощо. Поняття «лісове насадження» є більш широким, але у лісогосподарській практиці вирішальне значення приділяється верхній частині пологу лісу, тобто власне деревостану. Причому морфоструктурні ознаки конкретних деревостанів опосередковано характеризують і самі лісові насадження.

Згідно Є. Цурику [21], кількісно-якісні характеристики деревостану можна умовно поділити на дві групи таксаційних ознак: ознаки стану і *морфологічної структури* та *продуктивність* деревостанів.

До ознак деревостанів, які характеризують їх стан та морфологічну структуру, відносяться наступні:

- походження (природне або штучне, насіннєве або вегетативне, корінне або похідне);
- форма (прості – одноярусні, що мають один полог; складні – багатоярусні, крони яких утворюють декілька пологів; ярус, на долю якого припадає найбільша частина запасу деревостану, називається основним, а інші яруси – другорядними.);
- вік (середній вік деревостану визначається з точністю до 5 років, коли він не перевищує 100 років, і з точністю до 10 років, коли цей вік складає понад 100 років; вік дерев у деревостанах можна визначити за кількістю річних кілець біля основи стовбура або віковим свердлом (буравом));
- групи віку (молодняки, середньовікові, пристигаючі, стиглі й перестиглі деревостани);
- вікова структура (одновікові та різновікові);
- склад (чисті – однопородні, змішані – з двох і більше порід; деревну породу, яку представлено в деревостані найбільшою часткою, називають переважаючою, домінуючою або панівною);
- середня висота (деревостану в цілому і окремих його порід);
- середній діаметр дерев (у деревостані в цілому і окремих його частин: ярусів, деревних порід, поколінь).
- До ознак деревостанів, які характеризують їх продуктивність в абсолютних і відносних величинах, відносяться:
 - запас (кількість деревини на одиниці площині деревостану в цілому і окремих його частин: ярусів, деревних порід, поколінь);

- середній та поточний приrostи (кількість деревини на одиниці площині, що приростає за певний проміжок часу в деревостані в цілому та в складі окремих його порід, поколінь тощо);
- повнота, густота і зімкнутість (ступінь щільноті стояння дерев, зімкнутості крон за породами, ярусами, поколіннями);
- клас бонітету (показник продуктивності деревостану та, певною мірою, показник якості умов місцевростання насадження);
- клас товарності (показник якісного стану деревного запасу і його придатності для виготовлення лісової продукції в цілому з деревостану або його частин: деревних порід, поколінь тощо).

Із наведеного переліку ознак видно, що деревостан має дуже складну будову. Дерева, відносячись до різних вікових поколінь, можуть утворювати два, три та більше ярусів; вертикальні ж яруси можуть бути сформовані також декількома складовими деревними породами. Тому, задаючись метою спрощення лісотаксаційних робіт, Н. Третьяков [22] запропонував «розділити насадження на прості та однорідні в собі частини», тобто на елементи лісу.

За Н. Третьяковим [22-24], «насадження будь-якої деревної породи, деревостан якої складається з дерев 1) одного і того ж віку, 2) одного і того ж походження (ліс, створений людиною, ліс природний, походження насіннєвого, вегетативного), 3) що однаково розвивались, 4) за однорідних загальних умов місцевростання на всій його площині, будемо називати елементом лісу». Тобто, сукупність дерев у насадженні, які відносяться до одної породи, одного вікового покоління та одного яруса, називається елементом лісу.

Аналізуючи історію розвитку лісового господарства України, слід зауважити, що найважливішою, поряд з іншими, завжди вважалась функція забезпечення промисловості лісосировинними ресурсами і понад усе – товарною деревиною. Не зменшилась вага цієї функції і в наш час, в умовах

економічної кризи, яку переживає країна. Поряд з цим, розвиток суспільства та економіки висвітлює проблему, про яку традиційно в тій чи іншій мірі не йшлося чи твердо не наголошувалось – це екологічна функція лісу.

З точки зору як і екологічного стану, так і раціонального економічного застосування, однією з основних складових таксаційних характеристик є біологічна продуктивність лісових насаджень, головний компонент якої є фітомаса деревостану. Будемо далі користуватися деякими поняттями у визначенні Н. Базилевич [25]:

Первинна біологічна продуктивність (біологічна продуктивність) – це продукція, що утворюється в надземній та підземній частинах лісового біоценозу в процесі фотосинтезу за одиницю часу на одиницю площині.

Фітомаса – це жива органічна рослинна речовина в надземній та підземній частинах деревостану з поділом на: зелені асимілюючі органи; деревина стовбура; кора стовбура; деревина гілок крони; генеративні органи; підземні (кореневі) органи. Вимірюється в т/га сухої речовини.

Складовими фітомаси здійснюється поглинання та довготермінове депонування діоксиду вуглецю й продукування кисню в процесі асиміляції.

Дослідження первинної продуктивності лісів як окремого науково-практичного напрямку почалися на початку 70-х років ХХ-го століття в процесі виконання Міжнародної біологічної програми (МБП) [26, 27]. Методики цих робіт не передбачали розробки нормативів оцінки компонентів біологічної продуктивності дерев і деревостанів. Проведені дослідження носили ботанічно-описовий характер. Завдяки цим дослідженням у науковій літературі вперше з'явились обґрутовані визначення біологічної продуктивності лісів та її складників.

Дослідження у цьому напрямку продовжуються низкою наукових та науково-дослідних організацій України. Зокрема, дослідження щодо параметричної структури деревостану та оцінки компонентів надземної

фітомаси дерев головних лісотвірних порід України здійснюються вже понад чверть століття на кафедрі лісової таксації та лісовпорядкування Університету біоресурсів України під керівництвом проф. П. Лакиди [28, 29].

Останнім часом істотна нестача традиційних лісосировинних ресурсів і значне погіршення екології довкілля, викликане промисловими забрудненнями, наслідками чорнобильської катастрофи, лісовими пожежами тощо, призвели до більш чіткої диференціації досліджень фітомаси лісів як окремого напрямку наукових і прикладних досліджень.

Заходи щодо одержання комплексній оцінці фітомаси прописані окремою позицією у низці міжнародних, європейських та національних програм з моніторингу лісів. Періодичне проведення таких оцінок вважають за необхідне в Об'єднаному дослідницькому центрі Європейського Співтовариства (JRC), Європейській економічній комісії ООН (UNECE), ФАО ООН тощо [30-33].

Відповідно до вимог міжнародних норм та положень Рамкової конвенції ООН з питань зміни клімату (UNFCCC), вимог інших нормативно-правових документів, країни повинні систематично надавати відповідним міжнародним інституціям відомості щодо бюджету вуглецю своєї території, але це неможливо виконати без достовірної інформації про ліси, їхню біологічну продуктивність і наявну фітомасу [34].

Задоволення означених вище вимог, одержання достовірних і повних даних про поточний стан лісів, а також комплексне розв'язання екологічної та ресурсної проблем України в лісовій галузі у цілому неможливі без значної переорієнтації політики ведення лісового господарства, розробки і впровадження новітніх методів, засобів та технологій для її реалізації. Це в повній мірі відноситься до задачі визначення фітомаси.

1.2. Основні методи визначення надземної фітомаси деревостанів

Методи визначення фітомаси дерев, що використовуються у фітобіометрії, поділяються на такі, що потребують фізичного контакту з рослиною, та такі, де це не потрібно. Методи першої групи відносять до *прямих*, методи другої групи називають *непрямими*, або безконтактними.

В свою чергу, непрямі методи вимірювання фітомаси деревостану підрозділяються на дві великі групи: 1) такі, що базуються виключно на даних польових обстежень та вимірювань дерев та їх компонентів фітомаси; 2) методи, які використовують дистанційну інформацію, що одержується з технічних засобів повітряного або космічного базування.

1.2.1. Оцінка компонентів фітомаси деревостанів та дерев наземним методом

Зміст найбільш поширеного прямого методу оцінки компонентів фітомаси складається у безпосередньому зважуванні фракцій фітомаси дерев у лісі; цей метод називається **ваговий**. Тобто вимірювання здійснюється шляхом відбору певного лісового матеріалу, наприклад, спилювання типових дерев-репрезентів і послідувального оцінювання об'ємних та вагових показників у сухому стані (прямий деструктивний шлях) [29, 35]. Цей підхід з одного боку методично найпростіший, а з іншого – найменш інформаційний. Він виник і методично оформляється в процесі реалізації МБП. Широке застосування знайшов у фітоценологічних дослідженнях біологів і лісників, де результати зводилися до біометричного опису об'єкту. За результатами для всіх пробних дерев складають спеціальні таблиці параметричної структури фітомаси, алometричні функції, регресійні рівняння тощо.

Головна перевага наземних прямих вимірювань – максимальна відповідність (наближеність) оцінок фітомаси дійсному стану рослинності,

тому саме основані на таких вимірюваннях методи звичайно використовують для «калібрування» інших методів розрахунку компонентів фітомаси.

Наземні непрямі методи визначення фітомаси, так звані **таксаційні**, базуються на вимірюванні параметричної структури деревостану (так званого середнього дерева), а саме у визначені середніх значень висоти дерева та діаметру стовбура на висоті грудей, бонітету, віку тощо з подальшим перерахунком їх у одиниці ваги [28, 29, 35].

1.2.2. Сучасні методи визначення надземної фітомаси деревостанів

За останні роки для оцінки фітомаси лісів стало актуальним впровадження нових, більш ефективних підходів, зокрема, основаних на дистанційних методах та технологіях ДЗЗ. Вони є найбільш практичною і економічно вигідною альтернативою наземним методам, а також можуть виступати незалежним джерелом отримання інформації про запаси і динаміку фітомаси [28, 35-38].

Основними перевагами дистанційних вимірювань та спостережень перед наземними (польовими) є: оперативність, тобто можливість проведення великомасштабних за площею досліджень за короткий час; можливості оперативного опрацювання та представлення матеріалів спостережень у цифровому картографічному вигляді; порівняно низька вартість накопичуваної інформації на одиницю площи.

Засоби ДЗЗ, хоча і не забезпечують таку високу точність оцінок фітомаси як польові методи, проте мають суттєві переваги в оперативності і дозволяють проводити обстеження на великих територіях, у тому числі важкодоступних [28, 36].

Таким чином, безперечною перевагою всіх наземних методів визначення фітомаси є відповідність реальності (достовірність) одержуваних оцінок фітомаси при технічній і процедурній простоті їх отримання. Але застосування наземних методів зустрічає серйозні труднощі, коли потрібні

оцінки рівню активності процесів фотосинтезу рослинності на достатньо великих площах, особливо в умовах обмеженого ресурсу часу.

Всі необхідні вимірювання та спостереження в методах ДЗЗ здійснюються шляхом оброблення та аналізу видових даних (зображень), які одержуються за допомогою технічних засобів, що встановлені або на повітряній платформі (літаку або гвинтокрилу), або на борту космічного апарату. Необхідні зображення можуть формуватися за допомогою таких засобів як фотографічні, цифрові багатоспектральні та гіперспектральні, радіолокаційні, лідарні.

Сьогодні можна із задовільною точністю оцінювати біофізичні параметри рослинності, зокрема, концентрацію хлорофілу чи розраховувати біomasу рослинності за даними багатоспектрального космічного знімання, що одержуються сучасними бортовими видовими технічними засобами (космічні апарати Landsat, RapidEye, GeoEye, WorldView та ін.), та гіперспектрального знімання (сенсори EO-1 Hyperion, AVIRIS, HYDICE та ін.) [36].

В основі застосування методів дистанційного визначення фітомаси лежить явище спектрально-вибіркової реакції рослинності на падаюче оптичне випромінювання. Така вибірковість фіксується на багатоспектральних аерокосмічних зображеннях ландшафтів з рослинністю і може бути оцінена за допомогою вегетаційних індексів. Найбільш часто з цією метою використовують такі індекси: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Reduced Simple Ratio (RSR) і Enhanced Vegetation Index (EVI) [36, 39].

Загальна схема отримання дистанційної оцінки фітомаси через вегетаційні індекси базується на побудові формули регресії. Так, проведені Дж. Донгом (J. Dong) та співавторами дослідження [40] показали, що значення NDVI і фітомаса лісів непогано корелюють між собою, а цей статистичний зв'язок може бути із задовільною точністю описаний формулою лінійної регресії.

Д. Чжен (D. Zheng) та ін. показали [41], що реальним є подальше підвищення точності оцінок надземної біомаси за допомогою знімків Landsat-7, якщо є адекватна модель формування оптико-спектрального сигналу.

В роботі [42] для оцінки фітомаси було використано космічні знімки надвисокої просторової розрізненості QuickBird. Г. Мауро (G. Mauro) пропонує використовувати індекс листкової поверхні (Leaf Area Index - LAI) для оцінки фітомаси.

З появою гіперспектральних аерокосмічних бортових засобів виникла можливість синтезувати нові різноманітні вегетаційні індекси й завдяки тому отримувати значно більш повну інформацію про реакцію рослини на падаюче оптичне випромінювання. Важливо також, що вегетаційні індекси на основі гіперспектра виявилися не такими чутливими до геометрії рослинності, як вегетаційні індекси на основі сигналів багатоспектральних зображень. В результаті, як показано в [43], досягається підвищення точності оцінок надземної фітомаси.

Таким чином, на сьогодні розроблено достатньо багато методів дистанційного визначення фітомаси на основі застосування багатоспектральних та гіперспектральних аерокосмічних знімків. Однак їм притаманні два основні недоліки: 1) більшість багатоспектральних і гіперспектральних аерокосмічних знімків, на які орієнтуються відомі методи дистанційного визначення фітомаси, мають відносно невисоку просторову розрізнювальну здатність; 2) всі оцінки фітомаси базуються на синалах, відбитих лише верхнім шаром рослинності, тобто в розрахунках ніяк не враховується тривимірність рослинних об'єктів.

Щоб подолати вказані недоліки, у світовій практиці для отримання кількісних характеристик рослинності, зокрема фітомаси, все частіше звертаються до такого активного засобу ДЗЗ, як лазерне сканування ділянок земної поверхні з борта літака або космічного апарату [44, 45].

Варто зазначити, що авіаційні системи лідарного знімання місцевості мають певні переваги при вирішенні тематичних завдань, а саме: відсутність

наземних геодезичних робіт по планово-висотній основі при виконанні повітряної лазерно-локаційні зйомки (для забезпечення координатами використовується метод прямого геопозиціювання); велика точність (точність при використанні лідарів досягає 15 см); висока продуктивність (досягає 500-1000 кв. км за один аерознімальний день); можливість роботи в нічний час.

Проте, заради об'єктивності, необхідно відмітити, що лідарні системи мають також деякі недоліки, а саме: зниження точності із збільшенням висоти; обмеження щодо висоти зйомки; дискретний характер даних.

Розглянемо принципи авіаційної лідарної зйомки (АЛЗ) більш детально.

1.2.3. Принцип авіаційної лідарної зйомки

Перші успішні спроби використовувати унікальні властивості лазерного випромінювання в задачах знімання земної поверхні з літака були здійснені на початку 1960-х років державними науковими установами США та Канади [46]. Після вирішення багатьох технічних та інших проблем, зокрема, проблеми позиціонування за допомогою GPS, деяким провідним кампаніям вдалось налагодити розроблення лазерних систем (лідарів, транслітерація LiDAR – Light Detection And Ranging) і наприкінці 1990-х років почалося їх практичне застосування.

В роботі [44] наводиться таке визначення для лідaru: це технічний засіб отримання інформації про віддалені об'єкти за допомогою лазерних оптичних систем, що використовують явища відбиття світла і його розсіювання в прозорих і напівпрозорих середовищах. Елементом випромінення лідара є напівпровідниковий лазер, що працює в імпульсному режимі з робочою довжиною хвилі у видимому або близькому інфрачервоному діапазоні. Лазер випромінює короткі імпульси, що розсіюються по всій сцені знімання. Поперечне розсіювання регулюється оптичною системою та за рахунок

використання дзеркала, що коливається, а подовжнє – за рахунок руху носія уздовж аерознімального маршруту. Зондуючі імпульси розповсюджуються по прямолінійній траєкторії від джерела у бік сцени зйомки. Якщо зондуючий імпульс стикається з перешкодою (поверхня Землі або наземний об'єкт), то в місці зіткнення лазерний промінь відбивається. Характер відбиття в більшості випадків є дифузним, внаслідок чого частина відбитої енергії імпульсу повертається у бік скануючого приладу, де і реєструється на приймачі випромінювання, який входить до складу оптико-електронного блоку (ОЕБ) локатора. Моменти генерування випромінювань зондуючого імпульсу, а також реєстрація відбитих імпульсів фіксуються і обробляються з високою точністю за допомогою пристрою Time Interval Meter (TIM), що також входить до складу ОЕБ. Це дозволяє визначити часовий інтервал, що витрачається зондуючим імпульсом на розповсюдження від джерела до приймача і назад, що, у свою чергу, зважаючи на прямолінійність розповсюдження лазерного променя і постійність швидкості розповсюдження електромагнітних коливань, дозволяє вимірюти відстань від джерела випромінення до об'єкту, що спричинив відбиття [45].

Отримані «первинні» дані з лазерного локатора називають лідарними даними (ЛД), а опрацьовані 3D точки лазерного відбиття від об'єктів – хмарою пунктів лідара.

Спочатку ЛД записувались виключно у форматі ASCII. Але при використанні цього формату існують дві серйозні проблеми. Перша проблема полягає в продуктивності. Інтерпретація даних висот ASCII повільна, а розмір файлу дуже великий, навіть для незначних обсягів даних. Друга проблема у тому, що вся додаткова атрибутивна інформація, що відноситься до даних ЛД, втрачається [47].

Тому з накопиченням великих обсягів даних лідарної зйомки стали використовувати бінарний формат LAS (*.las) як стандартний формат організації та розповсюдження ЛД. LAS є найбільш прийнятним форматом

для запису ЛД, оскільки файли в цьому форматі містять більше інформації і, будучи бінарними, можуть ефективно читуватися при їх імпорті.

LAS – це стандартний файловий формат для обміну даними лідарних зйомок, розроблений американським товариством з фотограмметрії та дистанційного зондування (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ASPRS) [47].

У зв'язку з постійним розвитком технологій лідарного знімання файл LAS також покращується та модифікується. На сьогодні ASPRS [47] розроблено 5 основних версій формату LAS (ver 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4). В даній роботі буде використовуватись версія LAS ver 1.2 2008 року як найбільш надійна та перевірена. В табл. 1.1 надано опис структурно-семантичних характеристик даних, що зберігаються у файлі LAS ver 1.2 для кожного лазерного імпульсу.

Інтенсивність відбитого лазерного імпульсу залежить від відбивальної здатності об'єктів. Інтенсивність використовується в якості допоміжних даних при ідентифікації та виявленні просторових об'єктів, при класифікації точок лідара, а також в якості заміни аерофотознімків, якщо вони не доступні. Якщо дані лідара містять значення інтенсивності, по них можна отримати зображення, що нагадують чорно-білі аерофотознімки.

У кожному акті сканування відбиття імпульсу може реєструватися до п'яти разів в залежності від об'єктів, від яких він відбивається, і можливостей технічного засобу. Один лазерний імпульс може відображатися і повернатися до сенсора як один раз, так і декілька. Перший відображенний сигнал належить найвищому об'єкту ландшафту, наприклад, це може бути верхівка дерева.

У випадку, коли імпульс відбивається одразу від земної поверхні, він буде мати тільки одне відображення. Відбиті сигнали із середини "спектра" зазвичай відповідають рослинності, а останні відбиті сигнали використовуються для моделей власне поверхні Землі.

Опис формату LAS

Значення	Опис	Формат
X	Координата x	long
Y	Координата y	long
Z	Координата z	long
Intensity	Інтенсивність	unsigned short
Return Number	Номер відбитого сигналу	3 bits (bits 0, 1, 2)
Number of Returns	Кількість відбитих сигналів	3 bits (bits 3, 4, 5)
Scan Direction Flag	Дирекційний кут польоту	1 bit (bit 6)
Edge of Flight Line	Напрямок сканування	1 bit (bit 7)
Classification	Класифікація точок (0-31 див. табл. 1.2)	unsigned short
Scan Angle Rank	Кут сканування	unsigned short
User Data	Дані користувача	unsigned short
Point Source ID	Порядковий номер	unsigned short
GPS Time	GPS-час	double
Red	модель RGB	unsigned short (0-255)
Green		
Blue		

Однак останнє відображення не завжди буде відповідати землі, наприклад, коли імпульс потрапляє в товсту гілку і не досягає земної поверхні. У цьому випадку останнє відображення сталося не від землі, а від гілки. Перший повернутий імпульс буде позначений як відбитий сигнал номер один, другий – як номер два і т. д.

Кожна точка може характеризуватися присвоєним їй класом класифікації, який визначає тип об'єкта, від якого відбився лазерний сигнал. Лідарні точки можуть бути класифіковані на кілька категорій, таких як:

поверхня землі, верхня межа пологу лісу, водна поверхня тощо. Класам присвоюються цілочисельні значення кодів, що зберігаються в файлах LAS. Коди класифікації були затверджені ASPRS для форматів LAS 1.1, 1.2, 1.3, 1.3. У специфікації LAS 1.0 відсутня готова схема класифікації, а також файли, в яких зазначаються коди класів. Коди класифікації LAS, визначені ASPRS, представлено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Класифікаційна схема LAS ver. 1.2

Код ознаки	Смислове значення
0	Created, never classified (класифікація не виконувалася)
1	Unclassified (не призначено)
2	Ground (земля)
3	Low Vegetation (низькоросла рослинність)
4	Medium Vegetation (рослинність середньої висоти)
5	High Vegetation (висока рослинність)
6	Building (будівля)
7	Low Point (шум)
8	Model Key-point (ключ моделі)
9	Water (Вода)
10, 11	Reserved for ASPRS Definition (Зарезервовано ASPRS)
12	Overlap (Накладення)
13–31	Reserved for ASPRS Definition (Зарезервовано ASPRS)

Кількість повернутих сигналів – це загальне число відзеркальень даного імпульсу. Наприклад, точка лазерних даних може бути другим відбитим сигналом з п'яти відображень.

Значення ребра лінії польоту варіюються між 0 та 1, в залежності від напрямку польоту.

Даним лідара може бути присвоєно значення RGB. Ця атрибутивна інформація інтегрується з супроводжуючої інформації з аерофотознімків.

Час GPS – значення часу відповідає числу минулих секунд у тижні.

Кут сканування – це значення в градусах в діапазоні від -90 до +90. При нулі градусів лазерний імпульс випускається перпендикулярно і здійснюється зйомка в надирі. При значенні, рівному -90 градусів, лазер випромінює імпульси вліво, а при +90 – вправо від літака в напрямку польоту. Більшість систем лазерного сканування працюють в діапазоні від -30 до +30 градусів.

Напрямок сканування – це напрямок руху дзеркала скануючої системи в момент випускання системою лазерного сигналу. Значення, рівне 1, відповідає позитивному напрямку сканування, а рівне 0 – негативному. Позитивний напрямок означає, що сканер рухається зліва направо по напрямку польоту, а негативне – навпаки.

Щільність імпульсів та розмір території охоплення залежать від висоти знімання та кута знімання, тобто при збільшенні висоти знімання зменшується щільність точок, а територія охоплення збільшується відповідно.

Кожен файл LAS містить метадані лідарної зйомки в блоці заголовка (хедері), також в хедері файла міститься інформація про географічну систему координат. Для географічної прив'язки (georeferencing) файлів для формату LAS використовують той же принцип, що й для стандарту GeoTIFF., тобто в хедері бінарного коду прописується ліва верхня і права нижня географічні координати.

1.2.4. Застосування авіаційного лідара для визначення надземної фітомаси

Канадська служба лісового господарства однією з перших у світові застосувала лідари та ЛД для потреб лісогосподарства, продемонструвавши результати профільного аналізу хмари точок лідара для оцінки висоти лісового пологу, розрахунку проективного покриття, побудови рельєфу, тощо [48].

Г. Маклін та В. Крабіл (G. Maclean & W. Krabill) [49] показали доцільність застосування ЛД для дослідження біомаси та запасу деревини, використовуючи залежність між висотою і щільністю точок лідара до загальної кількості біомаси. Р. Нельсон (R. Nelson) та співавтори у своїй праці [50] запропонували метод профілювання лазерних імпульсів, заснований на закономірності – чим більші висота і густота деревостану, тим більша його біомаса.

Однією з перших фундаментально-прикладних робіт, де було систематизовано результати застосування авіаційних систем лазерної локації місцевості, лісових масивів та інших фітоценозів, є монографія Р. Межерса (R. Measures) [45]. Тут розглянуто технології 3D-аналізу земної поверхні, визначення структури і фітомаси лісу по даним лазерної локації та супутниковых систем глобального позиціювання, на багатому фактичному матеріалі висвітлюються особливості і переваги лазерно-локаційного знімання при інвентаризації лісів, землевпорядкуванні і т. д.

В монографии [44] для представлення та оброблення ЛД широко застосовується частотний підхід, оснований на Фур'є-перетворенні.

Загалом оцінку фітомаси за даними лідара можна виконувати:

- шляхом статистичного аналізу картини лісового пологу за допомогою методів регресійного аналізу [44, 45, 50];
- шляхом автоматизованого виокремлення кожного дерева та визначення його параметрів, та з подальшим перерахунком у вагові показники фітомаси, використовуючи алометричні рівняння чи таблиці розрахунку фітомаси (або безпосереднім ваговим способом) [44, 51, 52].

В дослідженнях М. Лефскі (M. Lefsky) та ін. [51] показано перспективність оцінювання біомаси з використанням ЛД, оскільки, по-перше, тут виникає можливість формувати 3D-зображення і виокремлювати кожне дерево, а по-друге, ЛД забезпечують надзвичайно високу детальність на місцевості.

Оцінка фітомаси шляхом аналізу деревостанів на рівні найменшої структурної одиниці, тобто одного дерева, є важливою і найбільш перспективною [44, 52]. Тому в останні роки велика увага приділяється автоматизації виділення дерев, розробленню методів і алгоритмів, які дозволяють на основі даних лазерно-локаційного знімання частково або повністю автоматизувати процес вирішення означеної задачі [53-56].

Задача виділення дерева в деревостані за допомогою лідара була сформульована приблизно 15 років тому у дисертації Т. Брандтберга (T. Brandtberg), й з тих пір її актуальність не зменшилась [57]. На сьогодні розроблено багато алгоритмів для автоматизованого виділення дерев за ЛД, серед яких найбільше відомі такі:

Алгоритм 1: формування кластера з використанням підходу k-середніх. Щоб мінімізувати відхилення всередині кластера, за початковий пункт алгоритм використовує локальні максимуми. В процесі кластеризації у відповідних точках локальних максимумів використовується фактор зниження висоти [58].

Алгоритм 2: адаптована сегментація. Може бути використаний при первинному оцінюванні щільності плато або інтервалів між деревами, а також дозволяє виявити дерева в межах ділянки, які відрізняються за характеристиками (сухостої, хворі дерева, хвойне дерево серед листяних та навпаки) [55].

Алгоритм 3: метод локальних максимумів з регулюванням надлишку висоти, шляхом зміни кількості згладжувань, тобто зміною рівня інтерполяції для початкової фільтрації в ЛД або зміною значення гаусівського фільтра 3×3 (на думку авторів публікації [59], таке згладжування найбільш дієве для різних наборів даних).

Алгоритм 4: моделювання вокselів дерева на основі необроблених імпульсів лазера. Вокセル (від англ. volume – об’єм та element – елемент) — це

елемент просторового зображення, з яких складається растр у тривимірному просторі (аналогічний пікселу у двовимірних зображеннях) [54].

Алгоритм 5: сегментація на основі моделювання геометрії крони. Цей метод заснований на згладжуванні кореляційної поверхні, яка розраховується з урахуванням значень висоти ЛД [60].

Тим не менш, сучасні методи виділення дерев потребують покращення в деяких аспектах. Одним з головних обмежень є той факт, що більшість методів були розроблені на даних з boreальних лісів. Ліси цього типу характеризуються рідким розташуванням дерев з великими прогалинами між ними [61]. При порівнянні з кореальними, у помірних лісах виділення окремих дерев та їх параметрів більш складне, особливо для дерев у густому лісі [62].

Також більшість існуючих методів та алгоритмів, зокрема [61, 63, 64], пов'язані з побудовою та аналізом цифрової моделі місцевості (ЦММ), що є результатом інтерполяції поверхні і, таким чином, робить неможливим виділення частини дерев, які пригнічуються іншими домінуючими деревами.

Варто зазначити, що точність виділення дерев та його параметрів за даними лідара залежить від типу та технічних характеристик скануючої системи, від висоти знімання, типу лісу тощо.

У даній роботі буде порівняно більшість алгоритмів виділення дерев та відібрано найбільш інформативні, з подальшим покращенням та модифікацією.

1.3. Алометричні рівняння для розрахунку обсягів надземної фітомаси

Розрахунок обсягів фітомаси деревостанів основних лісотвірних порід України під час лісотаксаційних робіт здійснюється за нормативно-інформаційним забезпеченням [65]. Базуючись на моделях, одержаних в дослідженнях П. Лакиди та В. Усольцева щодо біологічної продуктивності

компонентів фітомаси деревостанів [28, 29, 66, 67], розрахунок компонентів фітомаси природних деревостанів сосни звичайної (*Pinus Sylvestris L.*) в абсолютно сухому стані здійснювався з використанням алометричних залежностей:

$$F_c = f(DBH, H_{tree}, P), \quad (1.1)$$

де F_c – відповідні компоненти надземної фітомаси деревостанів сосни звичайної (m/ga); f – функції відповідних таксаційних ознак деревостану; DBH – діаметр стовбура на висоті грудей; H_{tree} – висота дерева; P – повнота деревостану.

Оскільки повнота деревостану як таксаційна ознака виражає ступінь фактичного використання деревостаном даної форми, породи та віку, умов місцевостання, а це фактичне використання характеризується показником продуктивності, що вимірюється запасом деревини в m^3 на 1 га, то очевидно, що методично найбільш вірно розраховувати повноту деревостану шляхом співставлення його таксованого запасу з гранично можливим запасом нормального деревостану відповідної форми, породи та віку, зростаючого в аналогічних з таксованим умовах місцевостання. Проте через труднощі, що мають місце при таксації запасу деревостану, такий спосіб визначення його повноти на практиці майже не застосовують [21].

Н. Третьяков запропонував розділяти повноту деревостану на абсолютну та відносну [22]. Абсолютна повнота деревостану визначається в m^2 як загальна площа перетинів на 1 ga всіх дерев деревостану на висоті 1,3 м від кореневої шийки або як загальна площа горизонтальних проекцій крон дерев.

Відносна повнота деревостану виражається в десятих одиниці та розраховується як частка від ділення показників суми площин перетину таксованого деревостану (абсолютної повноти) із сумою площин перетину

нормального (еталонного) деревостану того ж складу, форми, віку, класу бонітету тощо. Таким чином, результат визначення відносної повноти в більшості випадків повинен варіюватися в діапазоні від 0 до 1, але бувають поодинокі випадки, коли таксувана повнота буде більше одиниці. За відносною повнотою насадження поділяють: високоповнотні 0,8–1,0; середньоповнотні 0,7–0,5; низькоповнотні 0,4–0,3; рідколісся 0,2–0,1 поодинокі дерева до 0,1 [20].

Спосіб встановлення повноти деревостану P заснований на припущеннях, що запаси таксованого M_T і нормального повного M_H деревостанів різняться лише сумами площ перетинів (відповідно $N_T G_T$ і $N_H G_H$), а середні їх видові висоти є однаковими, тобто $H_T P_T = H_H P_H$, звідки:

$$P = \frac{M_T}{M_H} = \frac{N_T G_T H_T P_T}{N_H G_H H_H P_H} = \frac{N_T G_T}{N_H G_H}, \quad (1.2)$$

де

$$H_T P_T = \sum H_{tree} \div n_{tree}, \quad (1.3)$$

де n_{tree} – кількість дерев;

$$N_T G_T = \sum_{i=1}^{n_{tree}} \frac{\pi \times DBH^2}{4}. \quad (1.4)$$

$N_H G_H$ – сума площ поперечних перетинів стовбурів дерев в m^2 на 1 га в нормальніх деревостанах, встановлених дослідним шляхом. Дані про площини поперечних перетинів стовбурів дерев містяться у таблицях ходу росту соснових деревостанів [65, с. 156-179], а також у стандартних таблицях сум площ перетинів та запасів деревостанів при повноті 1,0 [65, с. 338-340].

Останні наведені для деревостанів різних деревних порід в залежності від середньої висоти без урахування класу бонітету та віку. Проте, за умов однакового віку та числа дерев, повнота виявляється нижчою у деревостанах із затриманим ростом, зокрема в молодому віці. В густих непроріджених

деревостанах зімкнутість пологу близька до одиниці, а повнота, що визначається як відношення запасу даного деревостану до запасу нормального, виявляється значно меншою одиниці. Тому при визначені повноти різними методами можна отримати різні результати. Найбільш точно повнота деревостану визначається при використанні в якості еталону нормативів, побудованих не тільки за породами, середнім значенням висоти та діаметра стовбура, але й віком і класам бонітету.

Розглянемо основні формули для визначення загальної надземної фітомаси природніх деревостанів сосни звичайної за компонентами F_c фітомаси відповідно до роботи П. Лакиди [29].

Об'єм стовбура у корі розраховувався за формулою (m^3):

$$v = \frac{\exp(-2,592) \times DBH^{1,912} \times H_{tree}^{0,861}}{1000}. \quad (1.5)$$

Об'єм кори стовбура обчислювався:

$$v_k = \frac{v \times p_k}{100}. \quad (1.6)$$

Відсоток кори стовбура визначався за формулою:

$$p_k = \exp(4,580) \times DBH^{-0,116} \times H_{tree}^{-0,657}. \quad (1.7)$$

Фітомаса деревної зелені (ДЗ) у свіжозрубаному стані розраховувалася за формулою:

$$q_{D3} = \exp(-2,479) \times DBH^{2,493} \times H_{tree}^{-0,881} \times P^{-0,333}. \quad (1.8)$$

Визначення фітомаси гілок крони дерева з фракції ДЗ у свіжозрубаному стані, кг:

$$q_{g1l1} = \exp(-2,621) \times DBH^{3,066} \times H_{tree}^{-1,339} \times P^{-0,642}. \quad (1.9)$$

Визначення віку дерева (років):

$$a = \exp(2,139) \times DBH^{0,378} \times H_{tree}^{0,253}. \quad (1.10)$$

Оцінка базисної щільності деревини стовбура ($\text{кг} \cdot (\text{м}^3)^{-1}$):

$$\rho_{1\partial}^{cm} = \exp(5,620 + 0,00158 \times a) \times a^{0,0968}. \quad (1.11)$$

Розрахунок базисної щільності кори стовбура ($\text{кг} \cdot (\text{м}^3)^{-1}$):

$$\rho_{1k}^{cm} = \exp(5,994 + 0,00501 \times a) \times a^{-0,163}. \quad (1.12)$$

Фітомаса деревини стовбура (кг) в абсолютному стані розраховувалась за формулою:

$$m_{\partial}^{cm} = (v - v_k) \times \rho_{1\partial}^{cm}. \quad (1.13)$$

Фітомаса кори стовбура (кг) в абсолютному стані обчислювалась за формулою:

$$m_k^{cm} = v_k \times \rho_{1k}^{cm}. \quad (1.14)$$

Фітомаса стовбура в корі (кг) в абсолютному стані розраховувалась за формулою:

$$m^{cm} = m_{\partial}^{cm} + m_k^{cm}. \quad (1.15)$$

Фітомаса хвої (кг) крони дерева у свіжозрубаному стані розраховувалась за формулою:

$$q_{x\beta} = \frac{q_{\partial\beta} \times p_{x\beta}}{100}, \quad (1.16)$$

де $p_{x\beta}$ – відсоток хвої у деревній зелені, величина стала ($const = 66,7$).

Фітомаса хвої (кг) в абсолютно сухому стані розраховувалась за формулою:

$$m_{x\beta} = q_{x\beta} \times s_{x\beta}, \quad (1.17)$$

де $s_{x\theta}$ – вміст абсолютно сухої речовини у свіжій хвої ($const = 0,43$).

Фітомаса гілок крони дерева ($\kappa\varrho$) у свіжому стані:

$$q_{g\bar{l}l} = q_{g\bar{l}l1} + (q_{\partial 3} - q_{x\theta}). \quad (1.18)$$

Базисна щільність деревини гілок ($\kappa\varrho \cdot (m^3)^{-1}$):

$$\rho_{1\partial}^{g\bar{l}l} = \exp(5,028 - 0,00245 \times a) \times a^{0,282}. \quad (1.19)$$

Базисна щільність деревини гілок у корі ($\kappa\varrho \cdot (m^3)^{-1}$):

$$\rho_{\partial k}^{g\bar{l}l} = \exp(6,003 - 0,00694 \times a) \times a^{0,315}. \quad (1.20)$$

Вміст абсолютно сухої деревини гілок у корі:

$$s_{\rho}^{g\bar{l}l} = \rho_{1\partial k}^{g\bar{l}l} / \rho_{\partial k}^{g\bar{l}l}. \quad (1.21)$$

Фітомаса деревини гілок у корі в абсолютно сухому стані:

$$m_{g\bar{l}l} = q_{g\bar{l}l} \times s_{\rho}^{g\bar{l}l}. \quad (1.22)$$

Фітомаса крони дерева в абсолютно сухому стані:

$$m_{kp} = m_{g\bar{l}l} + m_{x\theta}. \quad (1.23)$$

Надземна фіто маса дерева в абсолютно сухому стані:

$$m_{dep} = m_{cm} + m_{kp}. \quad (1.24)$$

1.4. Постановка завдання на дослідження

Задача визначення надземної фітомаси лісів може вирішуватися як наземним, так і дистанційним способом, але методи, засновані на використанні даних ДЗЗ, є найбільш практичною і економічно доцільною альтернативою наземним методам.

Отже, у даній роботі ставиться мета підвищення точності оцінки надземної фітомаси шляхом розробки нового методу. Досягнення цієї мети планується здійснити за схемою, що зображена на рис. 1.1.

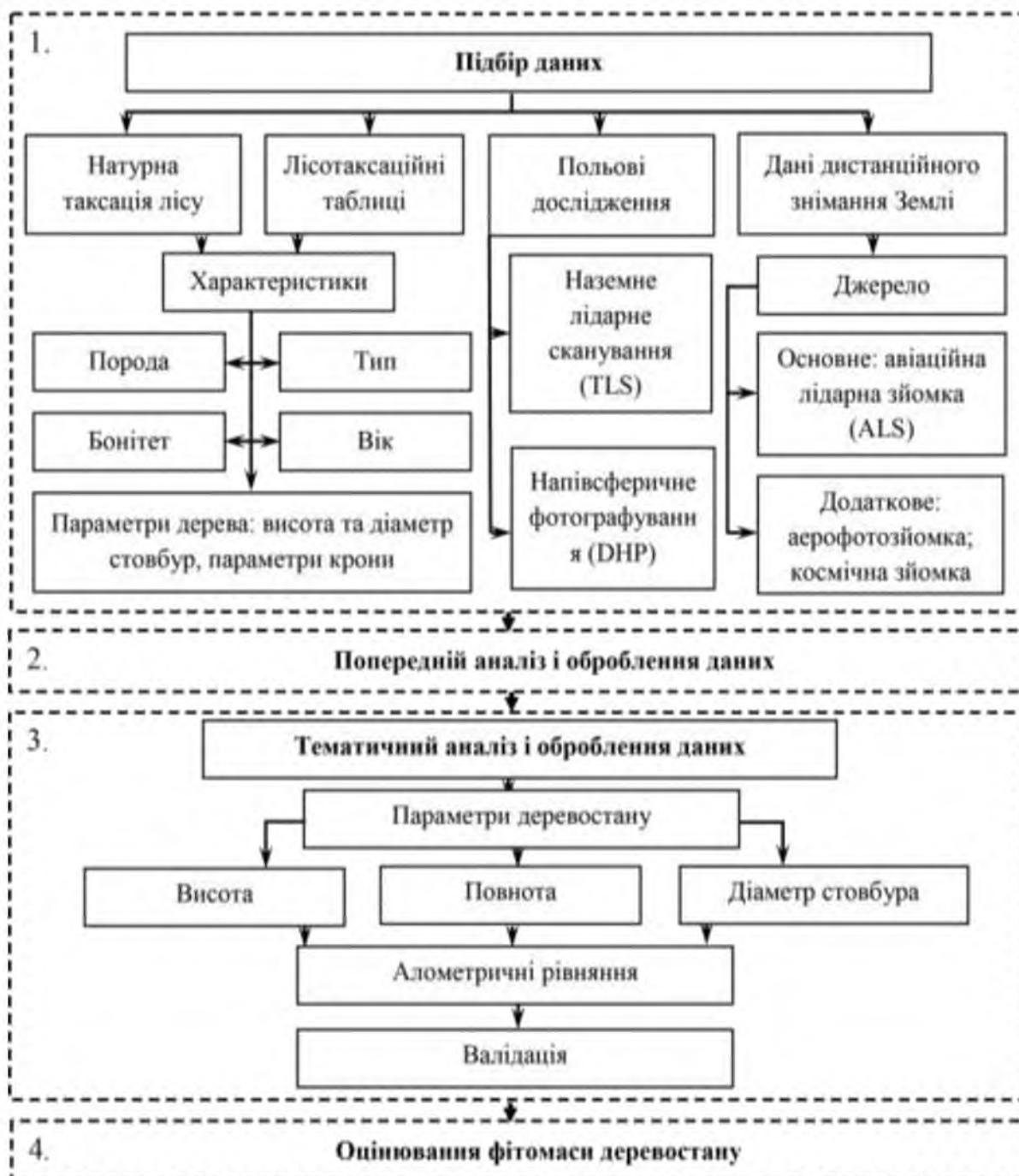


Рис. 1.1. Схема дослідження щодо оцінки фітомаси деревостану

Необхідно звернути увагу, що поки не вдалося розробити універсальний метод визначення фітомаси, який би можна було

застосовувати «напряму» для даних незалежно від типу лідара. Крім того, невід'ємним елементом кожної лідарної технології оцінювання біофізичних та морфоструктурних параметрів деревостану, при належних вимогах до точності оцінки фітомаси, є проведення наземних завіркових вимірювань на території дослідження. В силу цих двох чинників вирішення практичноожної задачі визначення фітомаси за даними лідарної зйомки потребує розробки додаткового науково-методичного забезпечення з урахуванням специфіки вхідних даних, властивостей об'єктів інтересу, регіональних умов і т. д.

Виходячи з усього вище викладеного, при розробці методу оцінки фітомаси необхідно враховувати низку особливостей та обмежень. Такі обмеження вводяться й у даній роботі, зокрема, щодо вибору «елементу лісу». В дисертації пропонується розглядати сосновий деревостан як базовий елемент дослідження. Сосна звичайна є основною лісотвірною породою в українському Поліссі. Вона займає близько 35% державного лісового фонду України.

Таким чином, для досягнення мети, а саме підвищення оперативності і точності визначення фітомаси деревостанів сосни звичайної на основі матеріалів авіаційної лідарної зйомки, у роботі потрібно вирішити такі завдання:

- удосконалити метод автоматизованого виокремлення кожного дерева в деревостані;
- розрахувати висоту кожного дерева;
- визначити діаметри стовбура на висоті грудей;
- розрахувати повноту деревостану;
- провести оцінку точності отриманих параметрів деревостану;
- оцінити кількість надземної фітомаси деревостану на територію дослідження.

Висновки до розділу

1. В розділі привертається увага до задачі вивчення біологічної продуктивності деревостанів, зокрема, до фітомаси як однієї з основних складових таксаційних характеристик лісу.
2. Проведено порівняльний аналіз сучасних методів визначення фітомаси деревостанів і показано, що одним з перспективних шляхів вирішення цієї задачі є застосування дистанційних методів. Розглянуто передумови застосування дистанційних методів та засобів для визначення фітомаси деревостанів в оцінюванні загальної фітомаси.
3. Проаналізовано переваги і недоліки засобів ДЗЗ, які можуть використовуватися при вирішенні даної задачі. Зроблено і обґрунтовано вибір на користь активних засобів дистанційного отримання інформації про лісові насадження, а саме авіаційного лідара.
4. Описано обрані алометричні рівняння для переведення кількісних показників деревостану у вагові. Розглянуто процес підрахунку повноти деревостану за висотою та сумою площ діаметрів стовбурів.
5. Сформульовано завдання на дослідження.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНИЙ АПАРАТ ПРИКЛАДНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ЛІДАРНИХ ДАНИХ

В розділі розглядаються процедури, які разом складають зміст попереднього аналізу і оброблення даних при оцінюванні фітомаси деревостану (див. блок 2 на рис. 1.1), а саме:

- 1) Підбір програмних продуктів для опрацювання ЛД.
- 2) Аналіз основних підходів та алгоритмів опрацювання ЛД.
- 3) Аналіз та вибір методів статистичного аналізу для визначення взаємозв'язків між таксаційними ознаками та переходу від однієї ознаки до іншої.

2.1. Особливості представлення геопросторових об'єктів при обробленні лідарних даних

На даний час існує достатньо багато різних засобів програмного забезпечення для роботи з ЛД (додаток А). Вони мають різну складність і неоднакові функціональні можливості, тобто являються спеціалізованими. Тому, як правило, розв'язання тематичної задачі ДЗЗ за допомогою ЛД потребує залучення кількох різних програм для їх оброблення та аналізу.

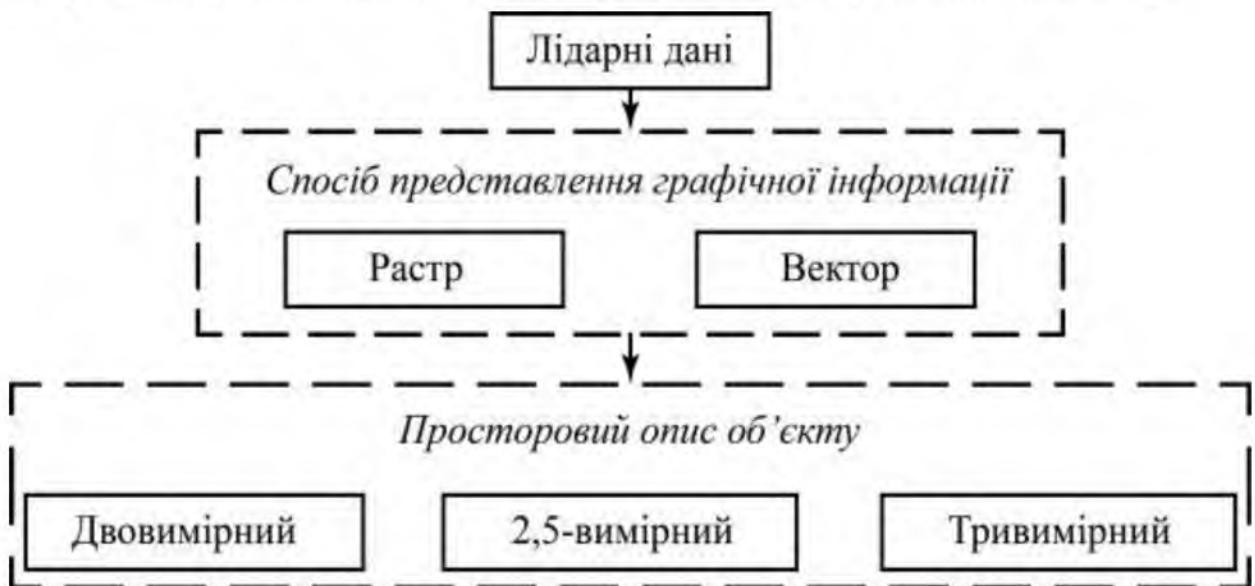


Рис. 2.1. Представлення графічної інформації

Зазначимо, що більшість програмних продуктів використовують сталі алгоритми та підходи, які можливо умовно поділити на два варіанти опрацювання ЛД: безпосереднє опрацювання первинних даних хмари пунктів або отримання растрових чи векторних похідних для подальшого аналізу (рис. 2.1).

Растровий спосіб представлення просторових даних, чи *растрова модель* просторових даних, полягає в зображенні просторових об'єктів у вигляді матриці елементів (чарунок) розмірністю $n \times m$, які організовані в рядки і стовпці, розмір яких відповідає розміру вихідного раstra [68].

Кожен елемент раstra називається чарункою (коміркою) раstra, або пікселем. У кожній комірці матриці інформація відображається одним числом. Положення кожного елемента раstra в просторі визначається номерами стовпця і рядка, у яких розміщений даний елемент. При растеризації ЛД даних стовпці розміщаються в напрямку північ-південь, а рядки — захід-схід. Як початкова комірка (з координатами 0, 0 чи 1, 1) найчастіше використовується комірка, розміщена у верхньому (або нижньому) лівому куті раstra.

Растровий спосіб представлення просторових даних має два різновиди – регулярних мереж (grid cells) і власне растровий (raster), що принципово не відрізняються один від одного, оскільки і той і інший базуються на представленні просторової інформації в кожній чарунці регулярної мережі, що суцільно покриває територію.

Векторним способом подання просторових даних, або векторною моделлю називають спосіб представлення об'єктів у вигляді найпростіших геометричних форм (примітивів), положення яких у просторі визначається за допомогою координат [68]. В ГІС визначаються точками, лініями та полігонами, а також взаємозв'язками між ними, які і складають геопросторові дані. Полігональні та лінійні об'єкти утворюються із набору точок, які

кодуються як сукупність координат, що, в свою чергу, апроксимують форму як лінійних, так і просторових об'єктів.

При опрацюванні ЛД для відображення рельєфу місцевості чи моделі пологу лісу використовують векторну полігональну структуру (модель) просторових даних у вигляді не тільки чотирикутників, але й у вигляді трикутників чи шестикутників, що робить аналіз більш гнучким [69].

Нерегулярна триангульована мережа (TIN) – форма векторних цифрових географічних даних, що використовується для цифрового відображення структури поверхні місцевості поверхні DEM (digital elevation model).

DEM – один з основних типів ГІС-даних та є узагальненим терміном для всіх цифрових моделей в ГІС. DEM відображає поверхню Землі і всіх об'єктів на ній у вигляді векторної чи растрої інформації.

TIN будується шляхом об'єднання відомих точкових значень у серії трикутників за алгоритмом триангуляції Делоне [70]. Модель використовується для представлення поверхні у вигляді сукупності суміжних тривимірних (3D) трикутних граней, що не перекриваються.

Основний принцип алгоритму триангуляції Делоне полягає в тому, щоб з наявного набору точок з відомими висотними позначками (значеннями координати Z) побудувати трикутники, які всі разом будуть максимально близькими до рівносторонніх фігур. Досягається це постійним контролем умови, відповідно до якої будь-яке коло, проведене через три вузли в трикутнику, не включатиме ніякого іншого вузла.

Завдяки своїй «нерегулярності» TIN-модель є більш гнучкою порівняно з растрою і дозволяє більш компактно і з меншими похибками описати поверхні. Тому TIN-модель найбільш широко застосовується для побудови цифрових моделей рельєфу. На рис. 2.2 показано приклади растрої та векторної цифрових моделей поверхні.

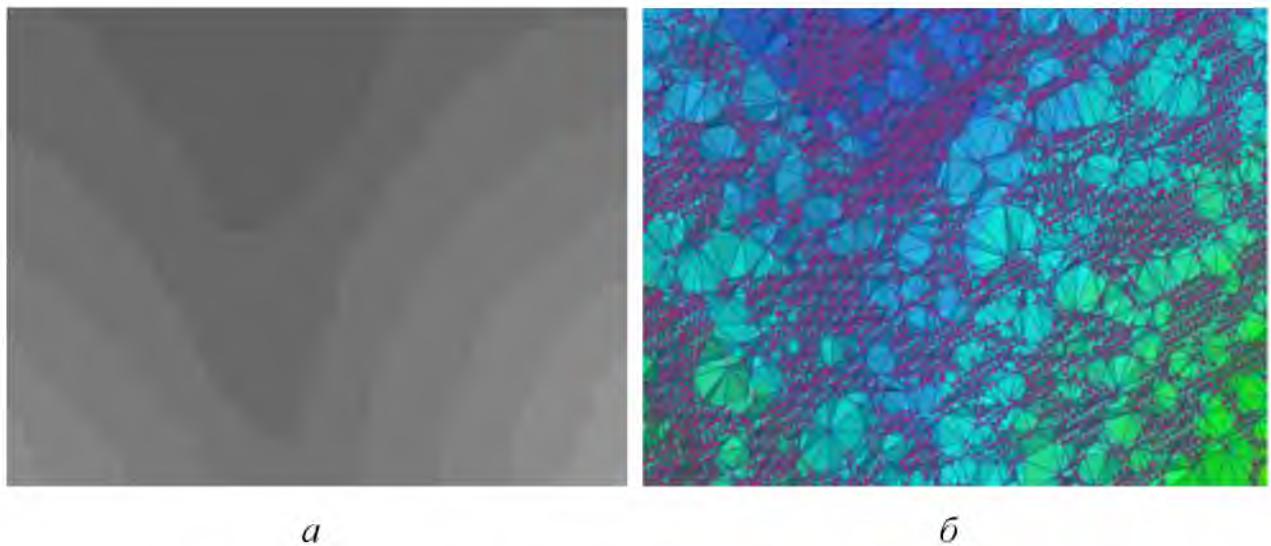


Рис. 2.2 Приклади цифрових моделей поверхні: *а* – растроva модель; *б* – TIN-модель (векторна модель)

Але при великих об'ємах даних, отриманих з лідара, використання TIN-моделей досить громіздке для великих за площею територій (вимагають великих обсягів даних). Тому доцільніше зберігати моделі місцевості у вигляді Terrain. Terrain – це структура класів просторових об'єктів, що заснована на використанні TIN-моделі зі змінним просторовим розрізненням [71].

Terrain зберігається як серія класів просторових об'єктів, таких як точки з відмітками висот і структурні лінії, та набір правил, що визначають, як саме ці дані повинні бути використані для відтворення всієї поверхні. Правила також визначають та вказують, як застосовані класи просторових об'єктів повинні бути інтегровані на різних масштабних рівнях. Наприклад, при дуже малих масштабах, можливо, немає необхідності в обробленні даних для врахування невеликих структурних, які не будуть помітно впливати на вид моделі місцевості в цьому масштабі. У цьому випадку такі структурні лінії будуть брати участь у Terrain-моделі лише у певних, більших масштабах. Залежно від необхідного рівня деталізації, для заданого масштабу в Terrain-моделі також буде використовуватися більше чи менше точок з відмітками висот (а, в результаті, буде більше чи менше трикутників)

залежно від вимог відображення. Таким чином, Terrain-модель, що складається з мільярдів точок, може швидко відображатися в різних масштабах.

Terrain насправді не зберігає завершене подання поверхні. Скоріше, це обчислювана «на льоту» TIN-модель, що посилається на відповідні дані джерела для поточного масштабу відображення. Отже, TIN-модель, створена з Terrain-структурою, розраховується на льоту і ніколи не зберігається постійно.

Відповідно до рис. 2.1, аналіз ЛД можливо здійснювати у двовимірному (2D), двох з половиною вимірному (2,5D) або тривимірному (3D) описі об'єкта.

При аналізі 2D в якості вхідного матеріалу служить растр, значення пікселів якого можуть мати будь-яку інформацію з ЛД (інтенсивність, номер повернення, значення RGB, тощо) [72].

Для переведення ЛД в растр треба вказати розмір піксела, що буде використаний при побудові растра.

Відповідно до потреб аналізу розмір піксела встановлюється: більший, ніж середній інтервал між точками; мінімальний – для визначення площин прогалин; довільний або за розміром піксела допоміжних матеріалів (аero- чи космознімків).

Оцінка відстані між точками розраховується для всіх точок, або тільки для точок в конкретному шарі або з окремим атрибутом. Наприклад, для атрибуту «Return Number» щільність точок велика, проте, якщо вибрати тільки останнє повернення, щільність буде значно нижча, при цьому середній інтервал між точками буде значно більшим. У той же час, тип класу «Ground», як правило, буде насичений точками, але також в ньому буде багато прогалин на місцях дерев. Якщо вибрати тільки точки «High Vegetation», то прогалин буде ще більше.

Найбільш відповідний розмір комірки – у чотири рази більше відстані між точками. Наприклад, якщо інтервал зчитування даних становить 1 м, а

розмір піксела дорівнює 4, можна очікувати, що в одній комірці буде знаходитися 16 точок.

Значення відстані між точками в більшості випадків надається постачальником разом з файлами точкових даних і може бути переглянуте у файлі метаданих. Якщо відстань між точками невідома, її можливо визначити в будь якому програмному середовищі (див. додаток А).

Існує кілька методів для визначення того, яку інформацію буде містити піксел при побудові раству з ЛД, якщо на одну чарунку потрапляє більш ніж один об'єкт [71]:

MOST_FREQUENT – атрибут, що найчастіше зустрічається;

SUM – сума значень атрибутів усіх точок в межах;

MEAN – середнє арифметичне значення;

STANDARD_DEVIATION – стандартне відхилення значень (тільки коли більше двох точок в одній чарунці);

MAXIMUM – максимальне значення;

MINIMUM – мінімальне значення;

RANGE – діапазон значень атрибутів точок в межах чарунки;

COUNT – число точок в чарунці.

Якщо розмір піксела більший за відстань між точками, то пропуски в даних повинні бути заповнені, якщо менший – значення піксела буде дорівнювати «NODATA» або «-9999».

З одного боку, наявність таких прогалин є перевагою растрової моделі, наприклад, їх площа, може бути підрахована для оцінки проективного покриття лісового пологу. А з іншого боку, вони можуть заважати при нормалізації цифрової моделі чи визначенні абсолютної висоти об'єкту.

Для усунення прогалин існує низка способів, але всі вони базуються на процедурі просторової *інтерполяції*. Існує дві основні групи методів інтерполяції: детерміновані і геостатистичні [71].

Методи детермінованої інтерполяції створюють поверхні з точок, ґрунтуючись або на ступені схожості (зворотні зважені відстані), або на рівні згладжування (радіальні базисні функції).

Геостатистичні методи інтерполяції типу Крігінг (Kriging) використовують статистичні властивості вимірюваних точок. Геостатистичні методи вимірюють просторову автокореляцію в вимірюваних точках і розраховують просторову конфігурацію опорних точок навколо інтерпольованого місця розташування.

Детерміновані методи інтерполяції можна розділити на дві групи: глобальні та локальні. Глобальні методи обчислюють інтерполяційні значення на підставі всього набору даних. Локальні методи обчислюють інтерполяційні значення на підставі точок, які є меншими просторовими областями всередині більшої досліджуваної території. Інтерполяція здійснюється за рахунок детермінованих інтерполяторів.

Детермінована інтерполяція може примушувати результиручу поверхню до проходження крізь значення даних, або не примушувати зовсім. Метод інтерполяції, який обчислює значення ідентичне вхідному значенню, називається жорстким інтерполятором. При використанні нежорсткого інтерполятора значення вхідних пікселів змінюються чи усереднюються.

Для виділення або приглушення об'єктів інтересу на зображення на основі їх просторової частоти проводиться *фільтрація* растроного зображення. Фільтрування раствури виконується з використанням алгоритмів *аналізі околу*.

Алгоритми, засновані на аналізі околу (околиці), створюють вихідні значення для кожного положення осередку на підставі значення в цій точці і значень, що визначаються в заданій околиці. Аналіз околиці може бути виконаний із застосуванням двох алгоритмів: за радіусом пошуку або пошук шляхом переміщення.

Алгоритми радіусу пошуку виконують обчислення, засновані на даних, що знаходяться на вказаній відстані від точкових або лінійних просторових об'єктів.

Найпоширенішим є аналіз сусідніх пікселів шляхом переміщення рухомого або «ковзаючого» вікна [71]. Робота рухомого вікна полягає у визначенні території з кількох комірок (наприклад, 3x3 або 5x5), на основі якої виконується розрахунок, й далі вікно переміщується. Розрахунок використовується для заміни значення комірки в центрі ковзаючого вікна. Вікно поступово просувається вздовж рядків та стовпчиків на одну комірку кожного разу і розрахунок повторюється доки все зображення не буде проаналізоване і не буде створено “нове” зображення. Змінюючи виконання розрахунку та вагу окремих комірок у вікні, можна розробляти фільтри для посилення або приглушення різних типів просторових об'єктів.

Важливо зазначити, що після виконання функції ковзаючого вікна результат кожного розрахунку зберігається у тимчасовому растрі, тому коли вікно рухається, заново розраховане значення комірки не враховується у наступних розрахунках. Коли всі вихідні дані оброблені, тимчасовий растр може бути скопійований у новий файл або може бути використаний для заміни всіх вихідних даних.

Загалом автори робіт [60, 73] рекомендують використовувати значення пікселів у вікні 3×3 зображення, що дає можливість оцінити похідні без значних втрат та значно скоротити час на розрахунки.

Зауважимо, що недоліком використання функції ковзаючого вікна є те, що розрахунок для комірок біля краю растру виконується з меншою кількістю вхідних даних, ніж для комірок більше до центру растру. Залежно від типу виконуваного розрахунку на краях растру можуть виникати помітні відмінності в результатах розрахунку. Це називається ефектом краю. Вирішення цієї проблеми полягає у створенні растру, більшого за кожним напрямком, і після модифікації даних за технологією ковзаючого вікна растр

за допомогою маски приводиться до вихідних розмірів, видаляючи територію, де виникає ефект краю.

Представлення об'єкта у 2,5D є таким, в якому третій вимір зводиться до простого відношення двох горизонтальних просторових вимірів, а Z є функцією від X та Y. Тобто для кожного значення X та Y може існувати одне і тільки одне значення Z [74]. Таким чином, третій вимір часто використовується для представлення атрибутивного значення, а не просторової координати, прикладом таких моделей в ГІС виступають цифрові моделі поверхні.

Значення первого відбитого сигналу є найвищим значенням для ділянки, що формує модель поверхні за рівнем крон дерев. Таку модель називають цифровою моделлю місцевості (ЦММ або DSM). Цифрова модель, що містить значення висоти земної поверхні, називається цифровою моделлю рельєфу (ЦМР або DTM). ЦММ і ЦМР розраховуються з первинних даних хмари точок лідара. Для наочності і кращого розуміння ЦММ і ЦМР схематично зображенено на рис. 2.3.

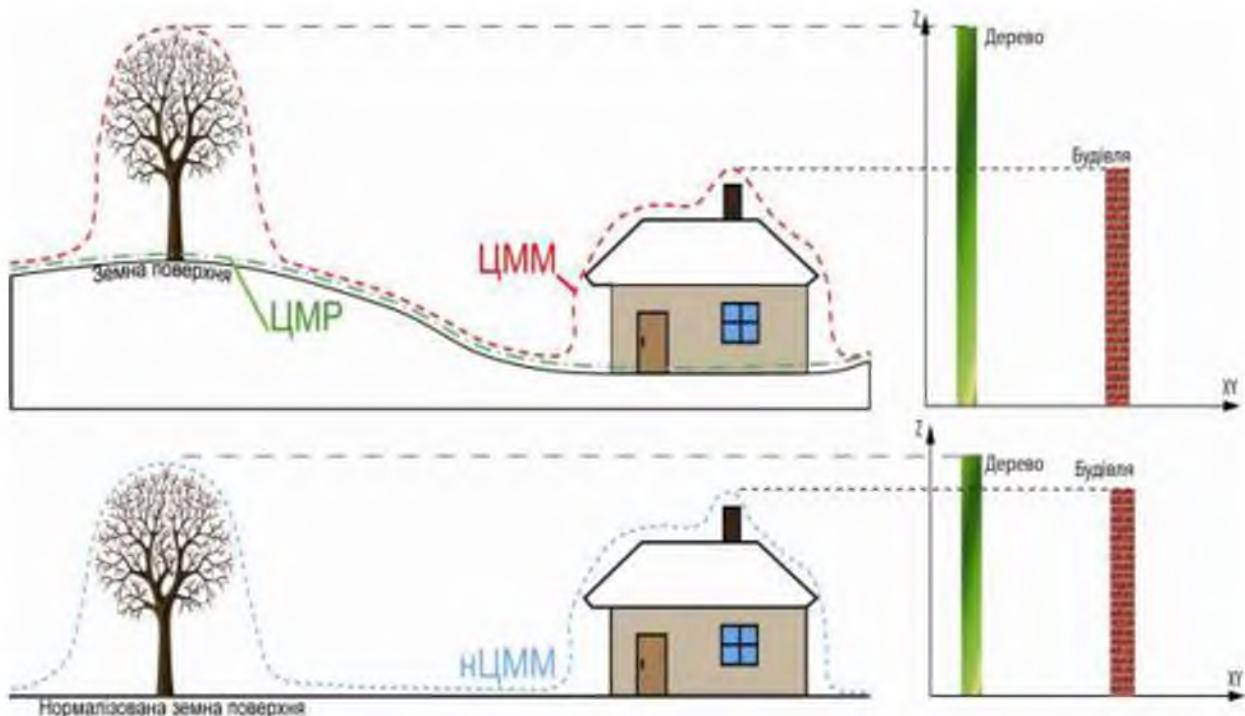


Рис. 2.3. Схема визначення дійсної висоти об'єкта

Для визначення дійсної висоти об'єкта виконують нормалізацію цифрової поверхні, тобто приводять значення Z до нуля (рис. 2.3). Нормалізацію цифрової моделі місцевості (нЦММ) створено методом віднімання значень висоти ЦММ від відповідних значень ЦМР [75].

Тривимірний опис об'єкта (3D – 3 dimension) – представлення об'єкта в трьох просторових вимірах. Як правило, ці виміри представлені у вигляді координат x , y , z . Зображення об'єктів у 3D здійснюється із застосуванням тривимірної графіки. Тривимірне зображення на площині відрізняється від двовимірного тим, що включає побудову геометричної проекції тривимірної моделі (сцени) на площину за допомогою спеціалізованих програм, при цьому модель відповідає об'єктам, що відображаються з реального світу.

Використання 3D-методу опису об'єкта в аналізі ЛД дозволяє аналізувати всі без виключення точки з хмари у тривимірному просторі, завдяки чому можна отримати об'ємні показники кожного окремого дерева, а не тільки морфоструктурні показники плато [76].

2.2. Основні підходи та алгоритми для обробки даних лідарного знімання

Метою обробки даних авіаційної лідарної зйомки є отримання максимальної кількості інформації про об'єкт дослідження, в нашому випадку про деревостан, тому вибір підходів та алгоритмів до аналізу ЛД є дуже важливим. Розглянемо основні з них, які будуть використані нами у подальшому для опрацювання ЛД.

2.2.1. Об'єктно-орієнтований підхід

Ідея об'єктно-орієнтованого підходу у тому, щоб аналіз і класифікацію зображень під час даного підходу здійснювати не на піксельному рівні, а на рівні об'єктів, тобто груп пікселів, об'єднаних на основі певної сукупності

критеріїв [77-79]. При подібному підході у якості ознак для класифікації можуть використовуватися не тільки спектральні яскравості пікселів зображення, але й інші похідні характеристики – статистичні, текстурні, морфологічні, геометричні та інші. У якості такого роду ознак розпізнавання можуть бути яскравості об'єктів, їх площа, периметр, ексцентриситет, протяжність, ентропія тощо [77].

В ряді робот [73, 80-84] наводиться, що об'єктно-орієнтований аналіз даних ДЗЗ, у тому числі й ЛД, надає ряд переваг у порівнянні з традиційними по-піксельними методами, зокрема, дозволяє підвищити достовірність класифікації складних об'єктів, спростити процес інтегрування результатів в ГІС. Завдяки тому об'єктно-орієнтований підхід все ширше застосовується в аналізі ЛД. Зокрема, Ч. Лім (Ch. Lim) в [73] довів доцільність застосування об'єктно-орієнтованого підходу до оцінки біомаси дерев за даними лідара та навів переваги цього підходу при визначенні розгалуження загальної крони на кілька крон у одного дерева.

Загалом процедуру об'єктно-орієнтованого аналізу зображень можна поділити на два етапи: перший спрямований на виділення об'єктів «обробка низького рівня», а другий етап – на їх класифікацію «обробка високого рівня».

В рамках першого етапу відбувається попередня обробка зображень з метою поліпшення їх якості, яка може включати в себе процедури радіометричної і атмосферної корекції, фільтрації шуму або перетворення яскравості тощо. Далі отримане зображення сегментується, тобто розбивається па регіони, які згодом проходять процедуру постобробки з метою, наприклад, збільшення плавності меж або зменшення кількості «прогалин». Отримані об'єкти області зображення є вхідними даними для наступного етапу обробки. На цьому етапі по вихідному зображеню для кожного побудованого регіону обчислюється набір ознак, залежно від поставленого завдання; цими ознаками можуть бути яскравісні ознаки,

ознаки форми, текстури та інші. Далі відбуваються вибір моделі класифікатора і його локальна настройка. Після цього об'єкти класифікуються.

2.2.2. Методи, засновані на кластеризації

Метод кластерного аналізу широко застосовують для аналізу ЛД, як у растрому вигляді при неконтрольованій класифікації, так і для векторному вигляді безпосередньо для хмари точок [85].

Залежно від характеру даних та мети кластеризації можуть використовуватися різні міри подібності для розміщення елементів в класах. Кластерізація може бути “жорсткою” і “м’ягкою” (“нечіткою”).

У жорсткій кластеризації дані розділяються на окремі кластери, де кожен елемент даних належить одному кластеру. При м’ягкій кластеризації елементи даних можуть належати до більш ніж одного тематичного напряму, і з кожним елементом множини пов’язана функція належності до кожного кластеру. Вона вказує на силу зв’язку між цим елементом даних і конкретною групою. Нечітка кластеризація є процесом присвоєння цих мір належності та їх використання для визначення складу кожного з кластерів.

Найбільш поширений метод кластерного аналізу, який використовується у ДЗЗ, – це метод k-середніх [86]. Даний метод, як показав С. Гупта (S. Gupta) [58], може бути успішно використаний для виокремлення дерева з ЛД.

2.2.3. Перетворення вододілу

Метод вододілу (також називають перетворенням вододілу) – це алгоритм, заснований на математичній морфології [87]. Математична морфологія забезпечує кількісний підхід при аналізі геометричної структури моделі поверхні полога лісу. Зокрема, специфічна послідовність морфологічних перетворень (трансформацій) бінарних (двійкових) і

напівтонових зображень може бути використана для виокремлення дерев чи окреслення крон [88].

В рамках перетворення *вододілу* передбачається розглядати зображення як топографічне подання деякого географічного ландшафту, де значення (наприклад, градація сірого) кожного піксела виступають значенням відносних висот [87].

Алгоритм вододілу включає в себе наступну послідовність кроків:

1. Виконується видалення шуму у вхідному зображенні; для чого застосовуються морфологічні операції закриття / розкриття.
2. Обчислюється морфологічний градієнт зображення без шуму.
3. Проводиться гаусовська фільтрація зображення.
4. Здійснюється пошук локальних мінімумів градієнту.

Отримані мінімуми градієнту утворюють точки зростання регіонів. На кожному наступному кроці алгоритму відбувається аналіз точки, що не належить жодній з поточних областей (нерозмічена) і вісім її найближчих сусідів. Якщо серед сусідів є розмічені точки, то нерозмічена точка приєднується до тієї області, до якої належить розмічена сусідня точка з мінімальним значенням градієнта. Порядок розподілу точок на зображенні визначається величиною градієнта в даній точці. Область закінчує ріст при «зіткненні» з сусідньою областю, а сам алгоритм закінчує роботу, коли всі точки зображення виявляються розміченими [89].

2.2.4. Підходи, засновані на моделюванні вокセルів

Одним із способів опрацювання хмари точок в тривимірному просторовому описі об'єкта є моделювання вокselів із первинних ЛД [54].

Для формування воксельної тривимірної моделі використовується прямокутна сітка у тривимірному просторі з координатами XYZ, яка називається воксельною сіткою (рис. 2.4 *б*), а кожен окремий елемент цієї сітки – воксел (рис. 2.4 *а*).

Ще однією перевагою застосування вокселів при аналізі, порівняно з хмарою точок лідара, є те, що вони мають чітко структуровану форму та геометрію, що полегшує отримання статистичної та об'ємної інформації про об'єкт дослідження.

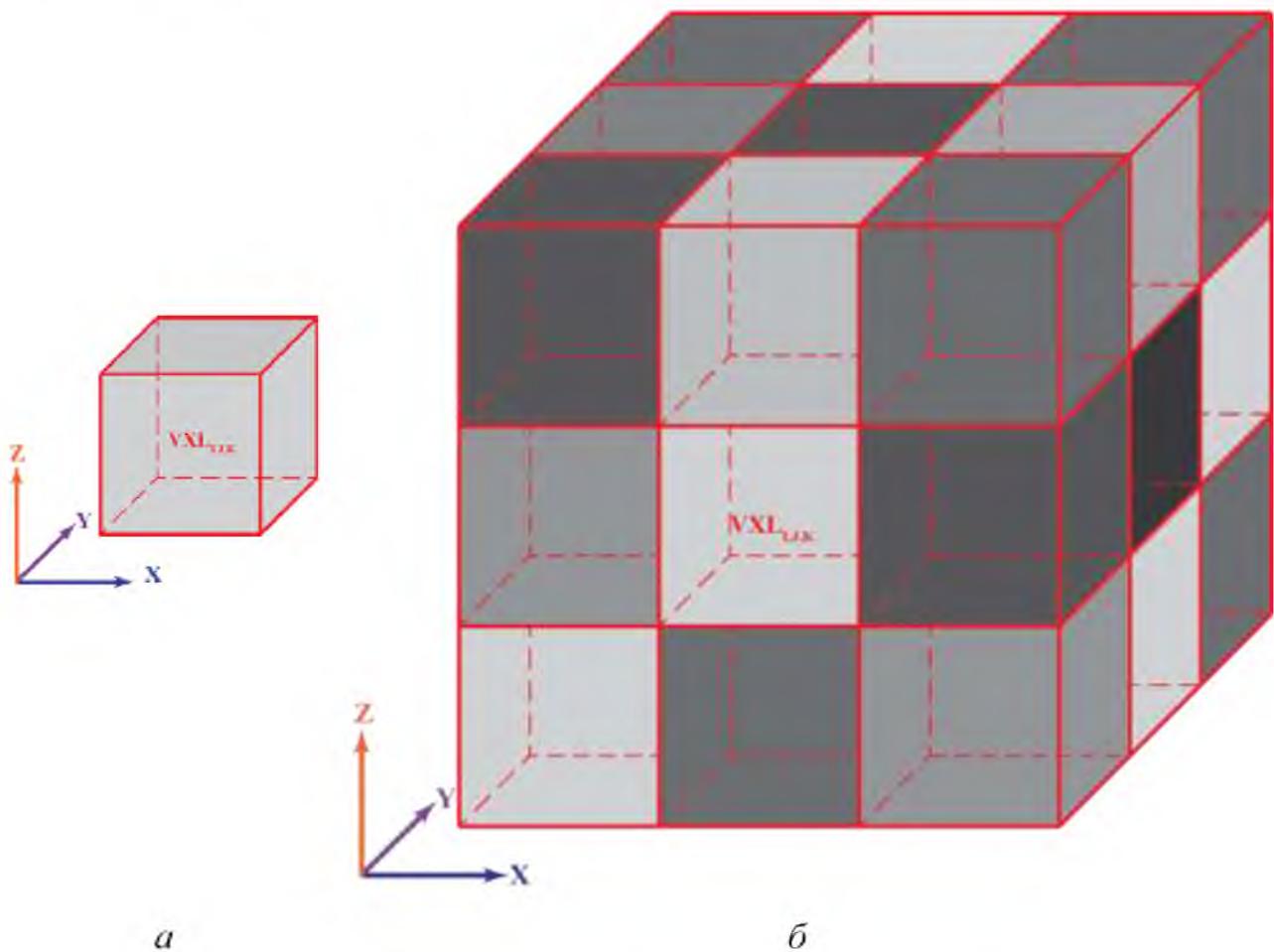


Рис. 2.4. Воксельна модель: *a* – вокセル; *b* – воксельна сітка.

Розміри вокселів можуть варіюватися для різного рівня деталізації на кожній з вісей. Проте дотримання кубічної воксельної консистенції буде доцільніше при проведенні розрахунків. Як і у випадку з пікселями, самі по собі воксили не містять інформації про свої координати в просторі. Їх координати обчислюються з позиції в тривимірній матриці – структурі, що моделює об'ємний об'єкт або поле значень параметра в тривимірному просторі. Цим воксили відрізняються від об'єктів векторної графіки, для яких

відомі координати їх опорних точок (вершин чи центрів) та інші параметри. Воксельні моделі мають певну розмірність, тобто кількість вокselів в кожному з вимірів. Кожен вокセル містить певну інформацію, наприклад, колір.

Недолік «вокселізації» полягає в тому, що деталі сцени, менші ніж розмір вокселя, видаляються в процесі растеризації. Тобто, об'єкти, які мали більш гладку форму, наприклад, верхівка крони дерева, що має циліндричну форму, прийме кубічну форму. Звичайно, розмір узагальнення буде залежати від просторової розрізненості вокселя: чим менший вокSEL, тим більше ця модель буде нагадувати дійсну форму об'єкта, та навпаки.

2.3. Статистичні параметри для визначення надземної фітомаси деревостанів з використанням лідарних даних

В основу розробки методу визначення надземної фітомаси деревостанів з використанням ЛД покладено положення про існування зв'язків між дешифрованими показниками дерев (висота, параметри крони, щільність деревостану, зімкнутість намету тощо) та відповідними параметрами фітомаси, а також деякими параметрами дерева і деревостану, які неможливо «напряму» визначити з даних АЛЗ [44, 50, 51]. Такі зв'язки можуть виражатися як функціональними, так і кореляційними залежностями.

Наприклад, площа поперечного перетину стовбура g , зв'язана з діаметром стовбура на висоті грудей (*DBH – Diameter at Breast Height*) функціональною залежністю:

$$g = \frac{\pi DBH^2}{4}. \quad (2.1)$$

При кількісному оцінюванні параметрів таких зв'язків, побудові функціональних і кореляційних залежностей із застосуванням матеріалів

лазерного знімання використовують, поруч з такими відомими параметрами, як математичне очикування, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації, також процентіль (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Параметри, отримані з ЛД, які можуть виступати у якості регресорів при побудові рівняння множинної регресії

Позначення	Опис
1) h_{\min} , h_{\max} , h_{mean} , h_{stdv} , h_{cv} ; 2) $h_{\min f}$, $h_{\max f}$, $h_{\text{mean}f}$, h_{stdvf} , h_{cvf} ; 3) $h_{\min l}$, $h_{\max l}$, $h_{\text{mean}l}$, h_{stdvl} , h_{cvl} .	Мінімальне, максимальне та середнє значення висоти, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації для: 1) всіх точок; 2) перше відбиття; 3) останнє відбиття
h_{P10} , h_{P20}, \dots, h_{P90} ; h_{P10f} , $h_{P20f}, \dots, h_{P90f}$; h_{P10l} , $h_{P20l}, \dots, h_{P90l}$.	Процентилі висоти: 1) всіх точок; 2) перше відбиття; 3) останнє відбиття
I_{mean} , I_{\min} , I_{\max} , I_{stdv} , I_{cv} .	Мінімальне, максимальне та середнє значення інтенсивності, стандартне відхилення, коефіцієнт варіації
dns.	Щільність точок

Процентиль (відсоток) – це характеристика набору даних, яка виражає ранг елементів масиву у вигляді цілих чисел від 1 до 100, і є показником того, який відсоток значень знаходиться нижче певного рівня. Якщо, наприклад, криву розподілу всієї сукупності висот класу «рослинність» розділити на 100 рівних частин, то отримаємо 99 частин, в кожній з яких буде своє значення висоти та частота їх повторюваності.

Наприклад, 25-й процентиль висоти в чарунці становить 8,6 м, тобто це означає, що 25% точок $\leq 8,6$ м, а 75% $> 8,6$ м. На рис 4.7 показано приклад нормального розподілу процентилей, тут позначено:

h_{P25} – нижній квартиль;

h_{P50} – медіана, або другий квартиль;

h_{P75} – третій, або верхній квартиль.

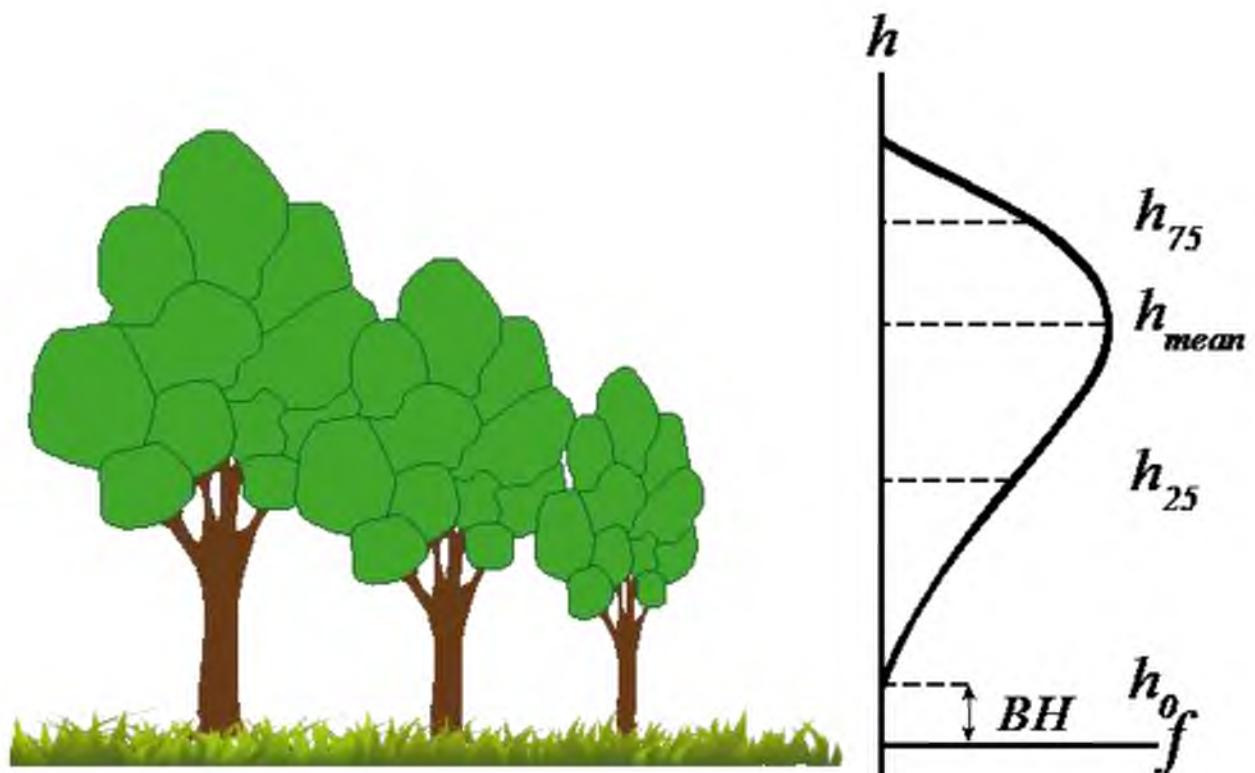


Рис. 2.5. Схема розподілу процентилей за висотою

При розробці метода визначення надземної фітомаси деревостану сосни звичайної на основі матеріалів авіаційної лідарної зйомки будемо спиратися на такі статистичні методи, як регресійний аналіз, метод Монте-Карло тощо [90-93].

Висновки до розділу

1. Розглянуто методичні основи прикладного опрацювання лідарних даних, зокрема, особливості представлення геопросторових об'єктів при обробленні лідарних даних та основні підходи та алгоритми для оброблення даних лідарного знімання.

2. Відзначено, що оброблення лідарних даних можливо в двох варіантах: безпосереднє опрацювання первинних даних хмари пунктів або отримання растрових чи векторних похідних для подальшого аналізу. Розглянуто можливості представлення геопросторових об'єктів двовимірному, двох з половиною вимірному та тривимірному описах об'єкта. Охарактеризовано принципи побудови векторної та растрової поверхні місцевості DEM.

3. Обґрутовано доцільність використання об'єктно-орієнтованого підходу в обробці даних авіаційної лідарної зйомки як такого, що забезпечує високу достовірність класифікації. Стисло розглянуто принцип вокセルної моделі даних.

4. Виділено групу статистичних параметрів, які далі застосовуються в роботі для регресійного визначення надземної фітомаси деревостанів з використанням ЛД.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАДЗЕМНОЇ ФІТОМАСИ ЗА ДАНИМИ АВІАЦІЙНОГО ЛІДАРНОГО ЗНІМАННЯ

3.1. Схема методу визначення надземної фітомаси за даними авіаційної лідарної зйомки

В основі розроблюваного методу дистанційного визначення фітомаси деревостанів сосни звичайної покладено положення, що для визначення компонентів фітомаси таксаційним методом потрібні дані про значення висоти дерев, діаметр стовбура на висоті грудей та повноти деревостану. Це положення має теоретичне підтвердження в [28, 29] і використовується у лісництві при переведенні у вагові значення фітомаси (див п. 1.3).

Виходячи з цього положення, метод оцінки надземної фітомаси деревостанів сосни звичайної (*Pinus Sylvestris L.*) за даними АЛЗ може бути представлений схемою, зображену на рис. 3.1.

Звідси випливають такі основні завдання для визначення фітомаси сосни звичайної на основі даних АЛЗ:

1) Визначення території дослідження та проведення лісотаксаційних та польових робіт. Вибір території дослідження є дуже важливим завданням оскільки розробити методику оцінки фітомаси для будь-якого лісового насадження в одній роботі неможливо, так як кількісно-якісні ознаки деревостанів варіюються для їх узагальнення.

2) Автоматизоване виокремлення кожного дерева в деревостані. Так як всі подальші розрахунки напряму залежать від точності визначення окремого дерева, головну увагу потрібно приділити пошуку найбільш дієвого алгоритму автоматизованого виділення дерев, з подальшим їх удосконаленням та адаптацією до території дослідження.

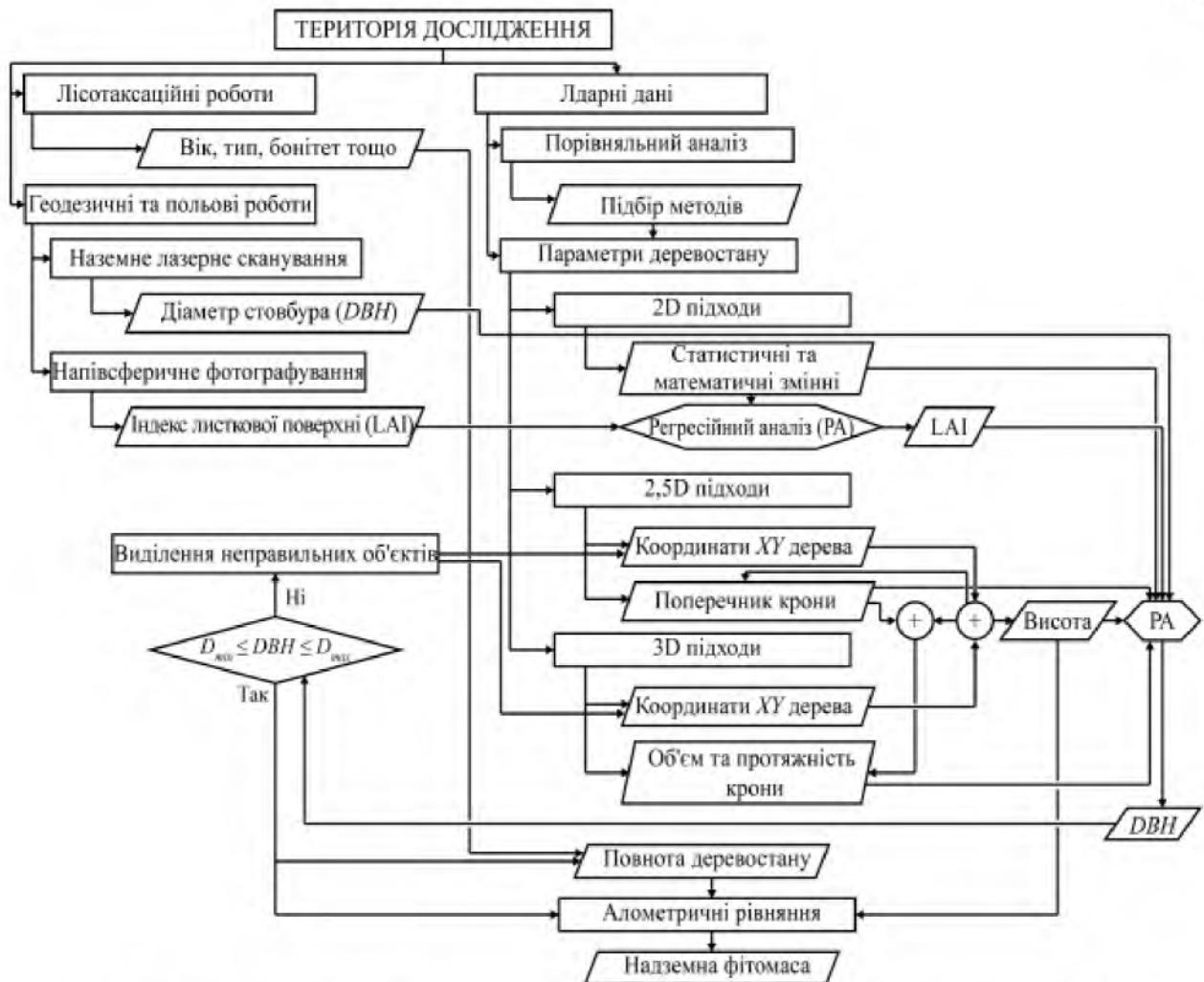


Рис 3.1. Схема методу визначення надземної фітомаси за даними АЛЗ

3) Розрахунок висоти кожного дерева. Визначення висоти з великою точністю можливо через нормалізацію (приведення до нуля) цифрової моделі місцевості або даних лідара.

4) Визначення діаметру стовбура на висоті грудей. Розрахунок DBH безпосередньо з ЛД частково або повністю неможливий (внаслідок обмежень властивостей сканера, умов зростання, ярусності тощо). В більшості випадків використання ЛД для визначення DBH зводиться до пошуку статистичних залежностей методом регресійного аналізу між діаметрами стовбура отриманими за допомогою наземних замірів та параметрів дерева отриманих дистанційно [44, 52]. Тому визначення потенційних регресорів для побудови шуканого рівняння є одним з основних завдань в даній роботі.

5) Розрахунок повноти деревостану. Загалом повнота деревостану під час лісотаксаційних робіт визначається в як загальна сума площ перетинів на 1 га всіх дерев деревостану на висоті 1,3 м від кореневої шийки. Таким чином, розрахунок повноти деревостану буде залежати від успішності розв'язання попередніх завдань.

6) Оцінка точності отриманих параметрів деревостану. Оцінити точність розрахунку параметрів деревостану отриманих на основі використання ЛД, а саме: висота дерев; кількість дерев на одиницю площини; точність просторового положення; діаметр стовбура на висоті грудей; повноту деревостану.

7) Розрахунок надземної фітомаси деревостану. Провести розрахунок надземної фітомаси за її компонентами на основі «Нормативи оцінки компонентів фітомаси дерев головних лісотвірних порід України» [29], використовуючи отримані параметри деревостану з ЛД.

8) Валідація методу визначення надземної фітомаси деревостану. Провести валідацію запропонованого методу на основі застосування статистичних підходів.

3.2. Територія дослідження та проведення польових робіт

Як вже відзначалось в п. 1.4 при постановці задачі на дослідження, розробка методу оцінки фітомаси має здійснюватися з урахуванням особливостей території. Про критичність вибору території дослідження і необхідність урахування кількісно-якісних ознак деревостанів в її межах вказується також в роботах [20, 21, 28, 29 та ін.]. Тому в даній роботі введено ряд обмежень щодо вибору «елементу лісу» (рис. 3.2).

На рис. 3.2: зеленим – умова «ТАК», тоді метод буде працювати правильно; червоним «НІ», можливо збільшення кількості помилок, або взагалі непрацездатність. Розглянемо головні таксаційні ознаки деревостанів, які впливають на точність пропонованого методу.

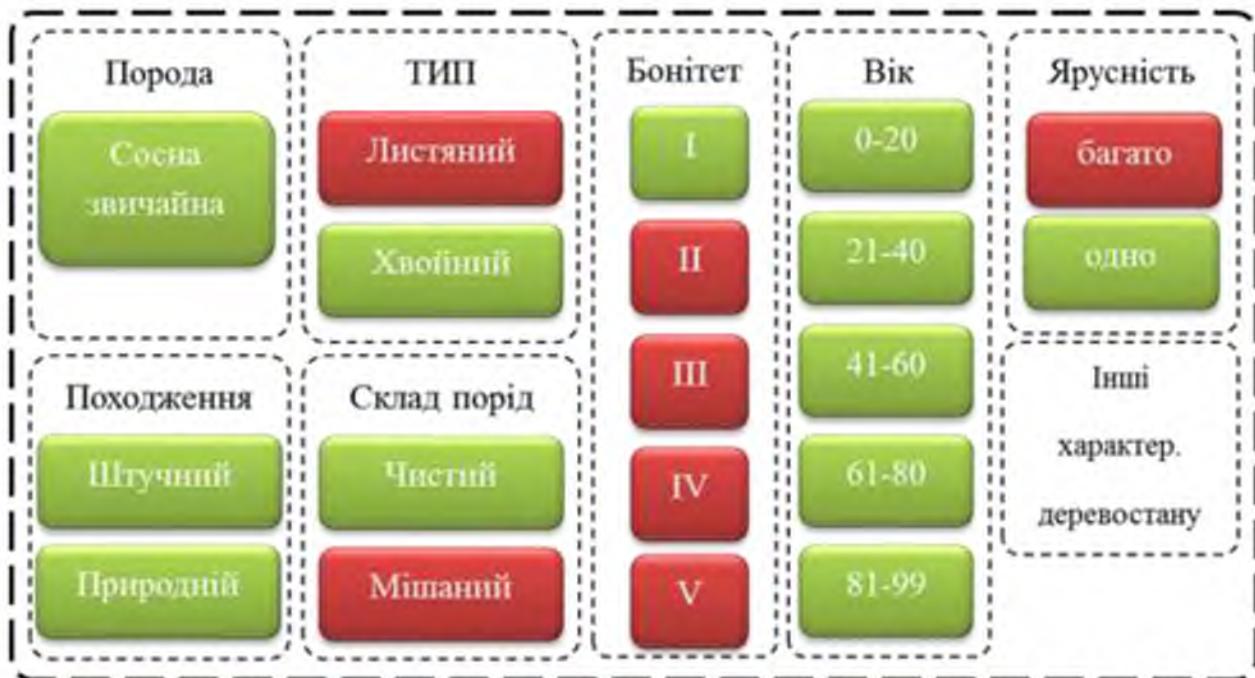


Рис. 3.2. Обмеження щодо вибору «елементу лісу»

Згідно рис. 3.2, головними умовами для вибору ділянки є:

- за формою – одноярусні;
- тип лісу – хвойний (бір);
- склад порід – чистий (сосновий деревостан);
- бонітет – перший клас (дана характеристика не є критичною).

Зауважимо, що вертикальна зімкнутість є головною вимогою для забезпечення працездатності методу, тому що фітомаса без підросту (підліску) при таксації лісу не визначається. Тобто, у багатоярусному деревостані окремо повинен обраховуватися кожен ярус, а це є доволі складна робота, й тому в одній роботі розробити універсальний метод оцінки надземної фітомаси для кожного яруса неможливо. Інші характеристики деревостану не є впливовими для пропонованого методу.

У роботі пропонується розглядати сосновий деревостан як елемент дослідження. Як вже відзначалося вище, сосна звичайна є основною лісотвірною породою в українському Поліссі, вона займає близько 35% державного лісового фонду України. Дерево з конусоподібною або пірамідальною кроною і моноподіальним, кільчастим гілкуванням (так звані

«мутовки»). Оскільки це світлолюбиве дерево, нижні його гілки відмирають, очищаючи стовбур. У сприятливих умовах висота сосни досягає 40 м, а діаметр стовбура - до 90 см. Дерева, що виросли в густому лісі, мають стрункі, майже циліндричні стовбури і невеличку, високо підняту крону з тонкими гілками [94].

Дослідження щодо можливостей визначення фітомаси за даними лазерного знімання проводилися на базі ділянки лісу площею порядку 22 га на території лісництва Мартев надлісництва Тучно Західнопоморського воєводства Польщі (координати центру ділянки: E16°05'42" N53°11'38") (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Територія дослідження та пункти вимірювання навколо вежі, на яких виконано наземне лазерне сканування і півсферичні фотографії

Особливості ділянки: домінує 52-річна сосна звичайна (основний деревостан) 99% та береза – 1% відповідно. На означену ділянку було отримано ЛД, напівсферичні фотографії, аерофотознімки та дані наземного сканування.

ЛД були одержані за допомогою авіаційного лазерно-локаційного сканера Optech ALTM з такими характеристиками [www.optech.com]: робоча довжина хвилі 1,064 мкм; розрізненність по висоті – від 5 до 35 см (в залежності від висоти знімання); розрізненність на місцевості – близько 18 точок на 1 кв. м; можливість роздільної фіксації 4-х імпульсів по дальності; динамічний діапазон сигналу – 12 бітів.

Необхідно зазначити, що вирішення лісотаксаційних задач дистанційними методами може здійснюватися як виключно на базі застосування ЛД, так і шляхом їх комплексування з матеріалами аero- або космозйомки. В останньому випадку на район робіт заздалегідь виконується підбір супутниковых знімків середнього і високого просторового розрізнення: Landsat, Quickbird, Ikonos тощо. З використанням стандартних методів і процедур здійснюються геометрична і радіометрична корекція супутникових зображень. Проводиться попереднє вивчення території та лісового покриву, зокрема за даними наземних спостережень, вимірювань, наявних картографічних і лісовпоряддних матеріалів.

Аерофото- та космознімки використовувалися в роботі для полегшення вивчення території досліджень і визначення місць точок наземного знімання та фотографування.

Використовувались також фотографії, одержані способом DHP (Digital Hemispherical Photography). Зміст цього способу та можливості описано нижче, у п. 4.2.

Фотографії DHP були одержані за допомогою фотокамери Canon EOS 5D з матрицею 12 мегапікселів та об'єктивом Sigma 8mm f/3.5 DG EX FISH EYE “Риб’яче око” (рис. 3.4, а), який дає змогу охоплювати простір в куту до 180° (рис. 3.4, б). Висота знімання, обиралась, як правило, на рівні висоти

грудей людини, тобто 1,3 м. Всі фотографії DHP були зроблені в ранковий період часу до сходу Сонця, як це рекомендовано Ф. Чіанучі (F. Chianucci) в роботі [95].

Якщо казати про традиційні ручні вимірювання (діаметра, висоти і положення дерева), то при проведенні наземних завіркових досліджень сталого підходу інколи недостатньо [96], тому що це досить трудомісткий спосіб при визначені великої кількості дерев, до того ж похибка при визначені просторових X та Y координат кожного дерева в географічній системі координат за допомогою мобільних GPS приймачів може сягати десятки метрів. Для вирішення цього завдання в роботі пропонується використання даних наземного лазерного сканування.

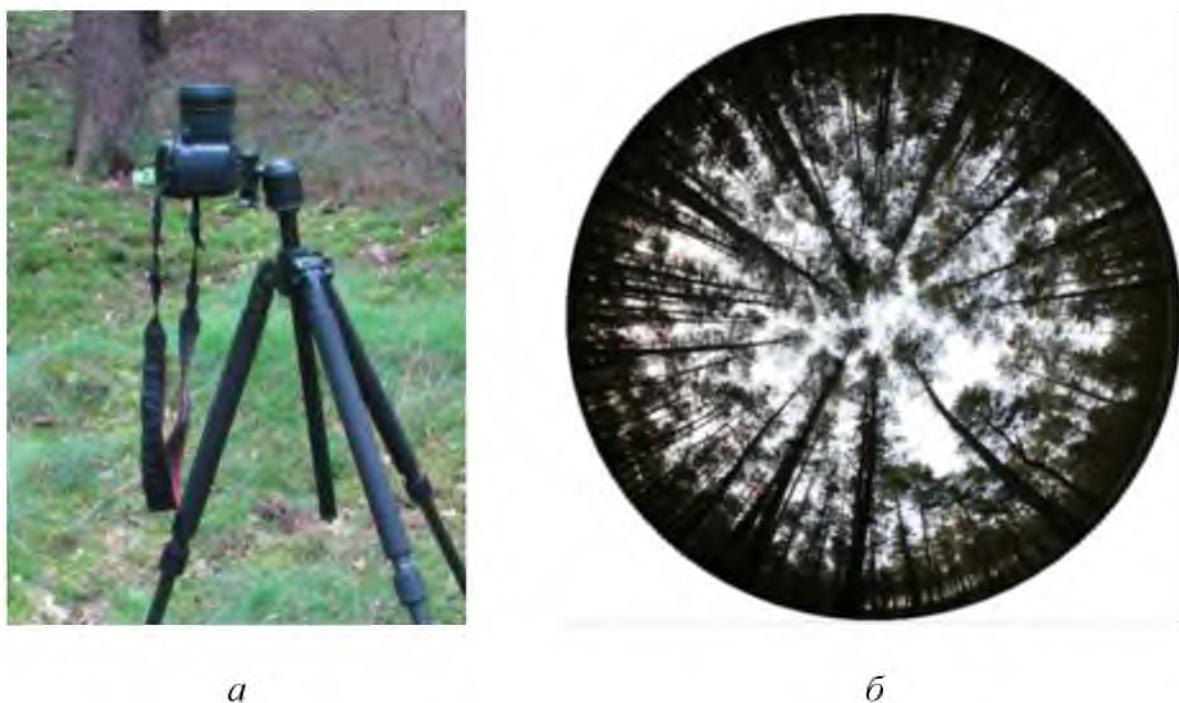


Рис. 3.4. Приклад процесу напівсферичного фотографування на території дослідження: *a* – цифровий фотоапарат з об'єктивом FISH EYE на штативі (з круглим рівнем) на висоті 1,3 м; *b* – приклад DHP.

Наземні лазерні дані (Terrestrial Laser Scanning – TLS) були отримані за допомогою сканера LS HE880 (Faro, USA) (рис 3.5).



Рис. 3.5. Лазерне наземне сканування: *а* – сканер фірми FARO; *б* – приклад даних наземного лазерного сканування.

Точне координування точок знімання DHP та TLS є ключовим для подальшого їх опрацювання, синхронізації й інтеграції в ГІС. Для точного координування (геопозиціювання) точок знімання використано геодезичні методи.

Вирізняють кілька способів визначення положення: абсолютні та відносні [97, 98]. При абсолютних визначеннях координати визначаються лінійною засічкою по кодовим вимірюванням псевдовідстаней. Цей спосіб використовується, в першу чергу, в навігації. Абсолютні визначення, в свою чергу, поділяють на автономні та диференційні. Автономні визначення здійснюються одним приймачем. При диференційних визначеннях використовуються щонайменше два приймача. Один – так звана базова (опорна) станція – працює на точці з відомими координатами (пункти державної геодезичної мережі) і формує поправки на основі різниці між визначеними по супутниках та наперед відомими координатами. Інший приймач безпосередньо здійснює позиціювання, використовуючи поправки створені базовою станцією.

В відносних способах координати визначаються спільною обробкою даних, отриманих кількома приймачами, серед яких щонайменше один

розділено на точці з відомими координатами. При цьому здебільшого використовується кодово-фазовий тип визначення відстаней. Спосіб дає високоточні результати і широко використовується при геодезичних вимірюваннях.

Геопозиційовані точки на місцевості було закріплено віхами (що показано на рис. 3.6). Загалом було задіяно 55 точок фотографування DHP та знімання TLS (див. рис. 3.2).



Рис. 3.6. Робочий приклад процесу наземно-зарікових робіт.

3.3. Попередній аналіз і оброблення лідарних даних

Для класифікації ЛД використовувалось програмне забезпечення TerraScan фінської компанії Terrasolid. Процес починається з визначення точок, що належать до ґрунту (Ground – GR), дану класифікацію було

реалізовано за допомогою функції «Classify ground». При вирішенні цієї задачі виявилось, що в простих ситуаціях програма TerraScan здатна це робити в автоматичному режимі, але у разі складної морфології потрібно було втручання в програму TerraScan для налаштування певних параметрів.

Наступним кроком був пошук та вилучення об'єктів з ЛД, що не належать до рослинності, таких як водні об'єкти чи інженерні споруди (стовпи ліній електропередач, будинки лісників тощо). В даному випадку для покращення аналізу ЛД потрібно залучати додаткові матеріали, такі як карти, схеми, багатоспектральні аеро- чи космознімки.

Виділити на зображені (місцевості) ділянки, які відносяться до рослинності, за даними багатоспектральних знімків можливо, використовуючи вегетаційні індекси, зокрема, індекс NDVI:

$$NDVI = \frac{E_{NIR} - E_R}{E_{NIR} + E_R}, \quad (3.22)$$

де E_{NIR} , E_R – інтенсивність оптичного сигналу у близькому інфрачервоному та червоному спектральному діапазонах відповідно.

Розрахунок NDVI базується на двох найбільш стабільних (незалежних від інших факторів) ділянках спектральної кривої відбиття рослин. У червоній області спектру (0,66–0,69 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих рослин, а в інфрачервоній області (0,78–0,92 мкм) перебуває область максимального відбиття клітинних структур листя. Тобто, висока фотосинтетична активність (пов'язана, як правило, з густотою рослинностю) веде до меншого відображення в червоній області спектру і більшого – в інфрачервоній. Для рослинності індекс $NDVI > 0$, і чим більше зелена фітомаса, тим значення NDVI вище [99].

Далі створюється векторна маска пікселів, значення яких при підрахунку NDVI є нижче 0,2. Одержана векторна маска накладається на лідарну хмару точок, щоб відокремити точки, які відносяться тільки до

рослинності. На рис. 3.7 *г* зображені точки інженерної споруди, які були відкласифіковані і віднесені до класу «Building».

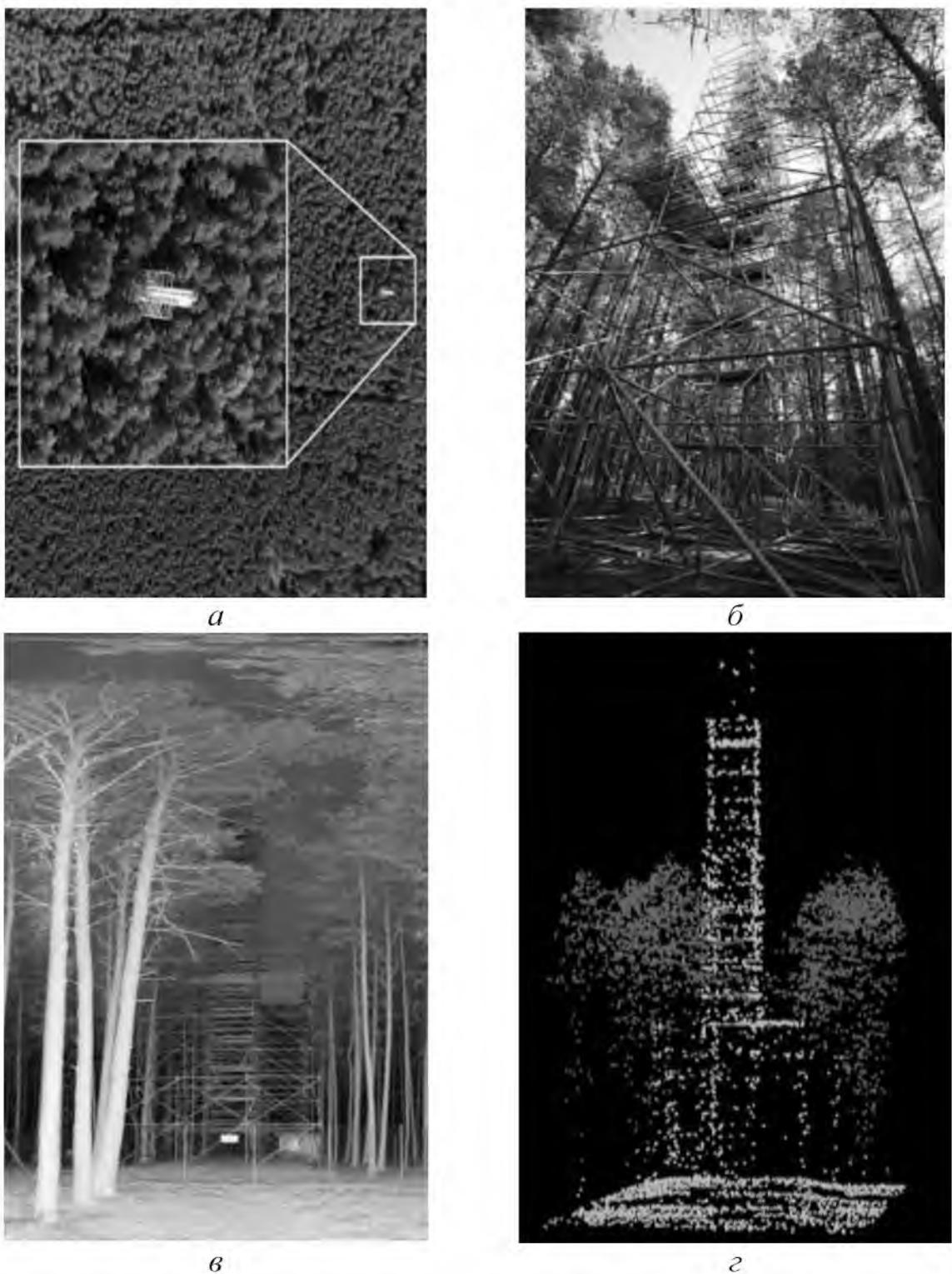


Рис. 3.7. Коваріаційна вежа на ділянці дослідження (Eddy covariance tower): *а* – аерознімок, *б* – фотознімок, *в* – дані наземного лазерного сканера, *г* – дані лідара.

Також класифікацію об'єктів, що не належать до рослинності, можливо здійснити, використовуючи стандартні інструменти безпосередньо в програмах, які «напряму» працюють з las-файлами.

Слід зазначити, що в хмарі точок присутні так звані побічні точки (шуми), що мають природній та неприродній характер. Тобто, під час акту сканування шуми можуть утворюватися з різних причин, наприклад, сигнал міг відбитися від птаха, автомобіля, що рухався, заломитися від дзеркала водія тощо. Дані точки треба вилучити або віднести до класу «Low Point» проаналізувавши хмару точок на аномалії. Наприклад, використовуючи метод просторового відношення точок, тобто застосовуючи критерій пошуку поодиноких точок, які знаходяться на великій відстані від основних.

Точки, що залишилися, класифікуються в залежності від висоти розташування та просторового положення.

Точки, що розташовані вище ґрунту до висоти 1,3 м включно (відповідно до висоти штативу з фотокамерою та загальноприйнятою висотою для замірів дерева, наприклад при вимірюванні DBH), в більшості випадків відносяться до кущів, жердняку, молодняку тощо, класифікуюмо як LV (Low Vegetation). Точки, що розташовані вище висоти 1,3 м, відносимо до основного типу вегетації Veg (High Vegetation).

3.4. Порівняльний аналіз методів виділення окремих дерев у деревостані на основі аналізу даних авіаційної лідарної зйомки

Для вирішення окремих задач, пов'язаних з автоматизованим виділенням дерев та його параметрів на основі ЛД, розроблено ряд програмних засобів (див. додаток А). Нами було проведено порівняльний аналіз відомих програмних продуктів, які містять в собі «вшиті» алгоритми автоматизованого виділення дерев. Їхній аналіз показав, що більшість цих програм направлені на виділення ялини. Даний тип дерев має правильну

конічну форму крони і великі перепади в плато, що полегшує їх виділення та дає хороші результати.

Але при виявленні інших порід дерев точність зменшується. Тому було вирішено використати фундаментальні основи виявлення дерев які закладені в програмний код цих програм для більш гнучкого їх налаштування.

Для виділення окремих дерев у деревостані в якості вхідного матеріалу для подальшого аналізу в 2D із значень шару Veg було створено растрове зображення з розрізнювальною здатністю 0,5 м з середнім значенням інтенсивності (першого відклику) для кожного піксела. Дане перетворення ЛД в раstroву форму було проведено з використанням інструменту «Point to Raster», ArcGIS, результат перетворення зображенено на рис 3.8, *a*. Як було зазначено в розділі 2, після перетворення раstrу з високою просторовою розрізненністю утворились прогалини на місці, де відсутні точки “Veg”, тому для даного раstrу було застосувано інтерполяцію пікселів раstrу.

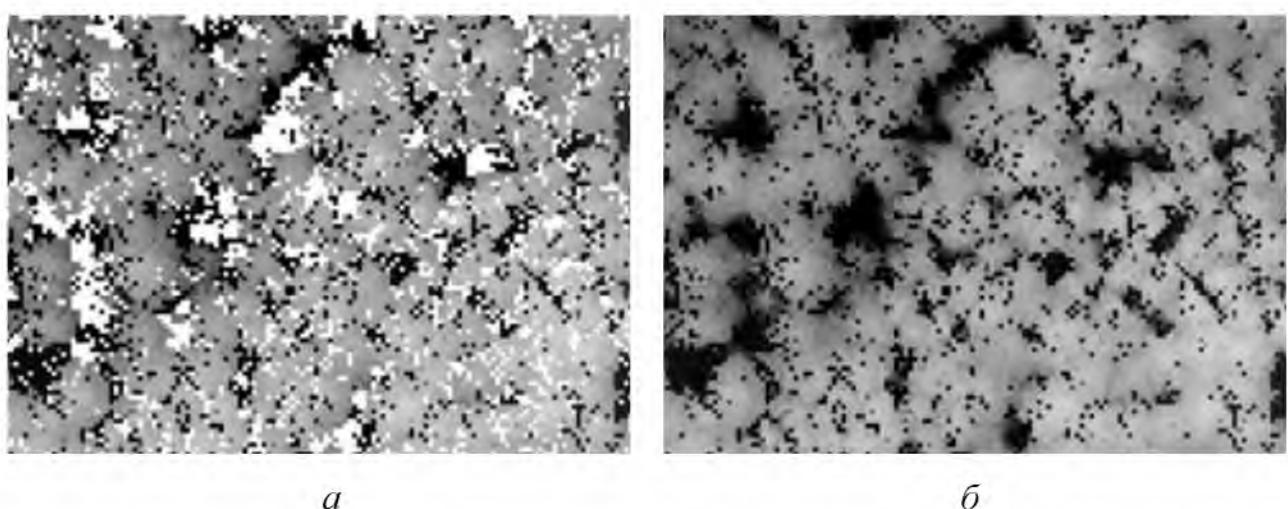


Рис. 3.8. Приклад застосування інтерполяції: *а* – білий колір – прогалини в даних, *б* – після заповнення прогалин інтерпольованими пікселями.

На рис 3.8 *б* показано приклад інтерполяції раstroвої моделі інтенсивності ЛД, застосовуючи функцію «Raster Calculator» інструменту «Spatial Analyst Tools»:

Con (IsNull ("%RasterName%"), FocalStatistics ("%RasterName%", NbrRectangle (3,3, "CELL"), "MEAN"), "% RasterName%")

Для опрацювання ЛД в 2,5D із середніх значень шару Gr було створено ЦМР (рис. 3.9, а), використовуючи інтерполяцію TIN.

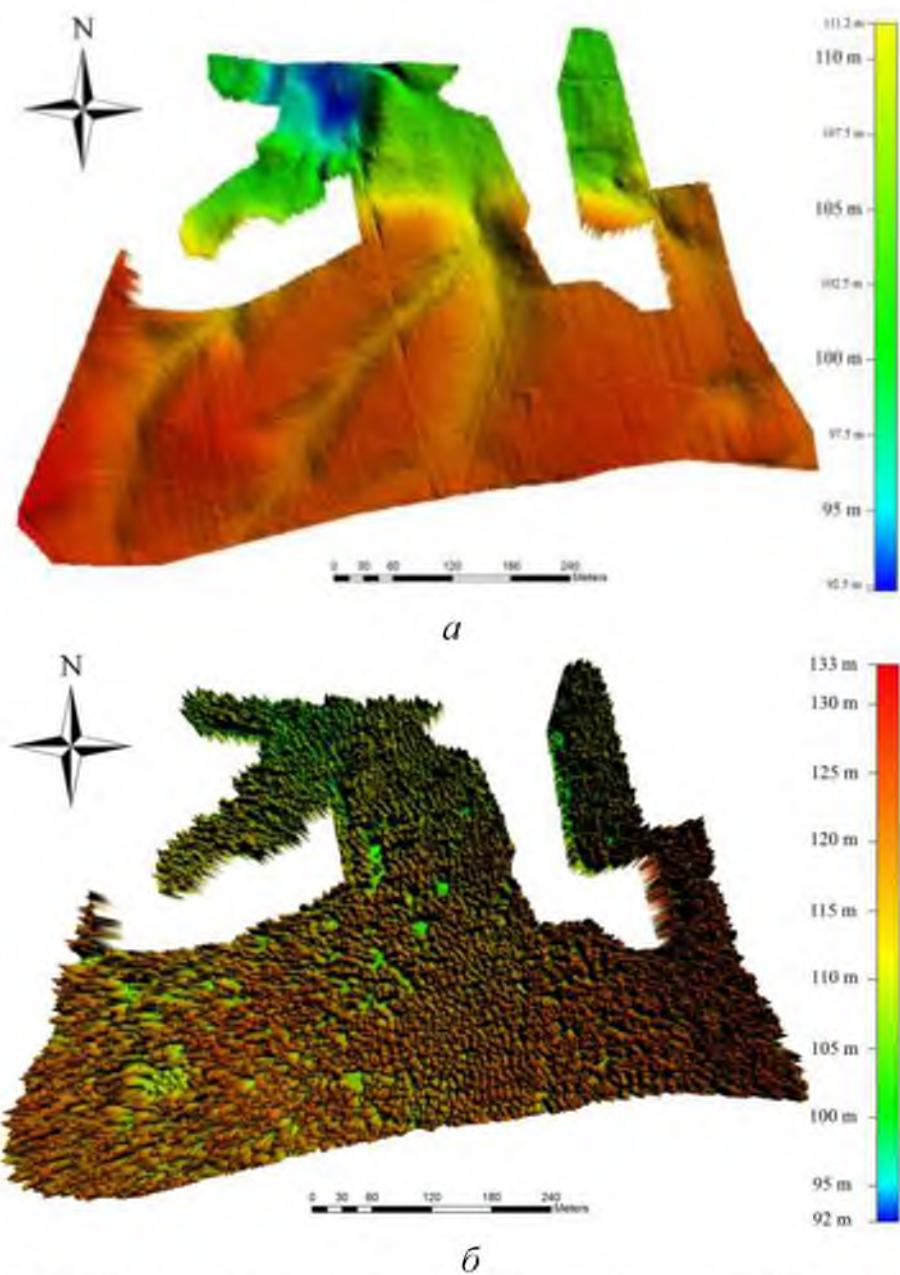


Рис. 3.9. Цифрові моделі поверхні: а – ЦМР, тобто модель «істинної землі» або рельєфу; б – ЦММ, або поверхня рослинного покриву.

Потім дану модель було перетворено в растроївий вигляд для полегшення подальшого опрацювання та поєднання з іншою растроюю інформацією.

ЦММ (рис. 3.9, б) було створено із найвищих значень шару Veg та інтерполювано тим же шляхом, як і при опрацюванні в 2D. Загалом до підбору методу інтерполяції та фільтрації треба звернути особливу увагу (див. розділ 2), тому що подальші результати будуть залежати від вибору цих алгоритмів.

Наступним кроком опрацювання 2D й 2,5D стало знаходження локальних максимумів, які в подальшому розглядалися, як вершини дерев. Для цього за допомогою програмного середовища ArcGIS 10.2. ЛД було перетворено в растр з просторовою розрізненністю 0,5 м із застосуванням інтерполяції та згладжування (рис. 3.10 а, б).

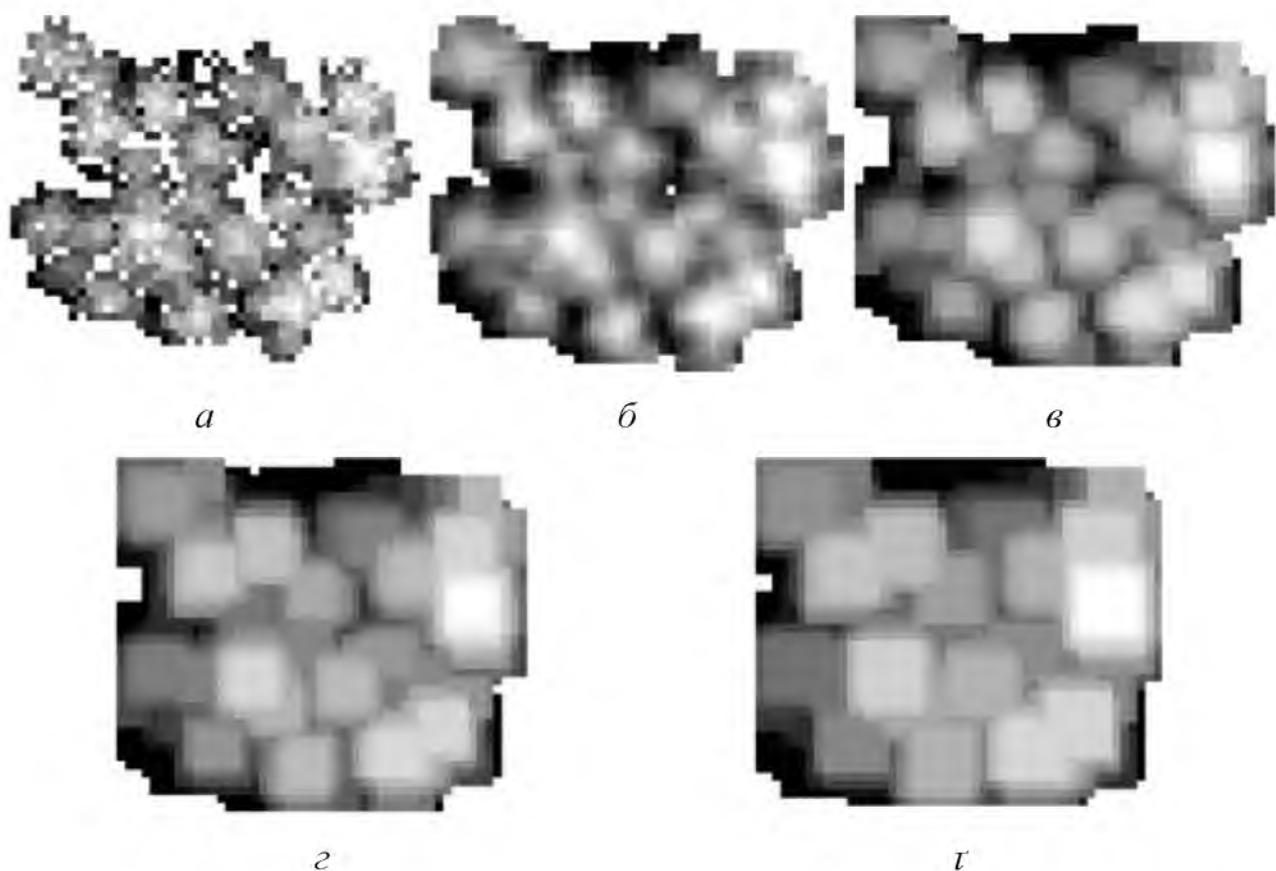


Рис. 3.10. Процес визначення локальних максимумів: а – растр створений з ЛД (розмір піксела 0,5 м); б – застосування інтерполяції та згладжування; в – застосування Focal Statistics 3×3, г –Focal Statistics 5×5, т – Focal Statistics 7×7.

До отриманого раству застосували інструмент Focal Statistics [arcgis.com]. Даний інструмент є статистичним інструментом та виконує операцію аналізу пікселів вхідного раству, де значенням для кожної осередку є функція значень всіх пікселів, які знаходяться в заданій околиці навколо цього місця. Тобто, в нашому випадку інструмент шукає найвище значення пікселів, якщо сусідні піксели мають менше значення – він назначає йому своє найвище, алгоритм зупиняє свою роботу, коли «перезаписав» 3 суміжні піксели (рис. 3.10, в).

Ітерацію можна продовжувати в залежності від просторової розрізленості чи потреб користувача, в даному дослідженні було використано вікно пошуку 7×7 . На рис 3.10 зображені результати отримані після виконання алгоритму Focal Statistics з різним кроком інтерполяції. Піксел b_{mn} можна вважати локальним максимумом, якщо для нього виконується умова $b_{mn} = v_{mn} = z_{mn} = t_{mn}$ (рис 3.10).

Локальні максимуми, які знаходяться занадто близько один до одного, виключалися на основі критерію *найближчої відстані*. Поріг відстані може варіюватися в залежності від типу та вікового стану лісу. Наприклад, розглядаючи деревостан, в якому переважають старі дерева, поріг відстані потрібно збільшувати, оскільки локальні максимуми, що розташовані близько один від одного, швидше за все, являють собою лише гілки, отже, мають бути усунені.

Таким чином, для молодих дерев локальний максимум буде знаходитись на піку крони, а відстань між точками буде порівняно більша. У даному дослідженні було вирішено використовувати поріг у 1,5 м. Результат отриманих локальних максимів зображені на рис. 3.11.



Рис. 3.11. Приклад визначених локальних максимумів, використовуючи ЦММ: *а* – вигляд на аерофотознімку; *б* – візуалізація 2,5D.

Для визначення висоти дерев було розраховано нормалізовану ЦММ (нЦММ зображене на рис. 3.12). Цю модель створено методом віднімання значень висоти ЦММ від відповідних значень ЦМР. Нормалізацію ЦММ здійснено для усунення впливу рельєфу місцевості та отримання абсолютної висоти кожної точки над землею.

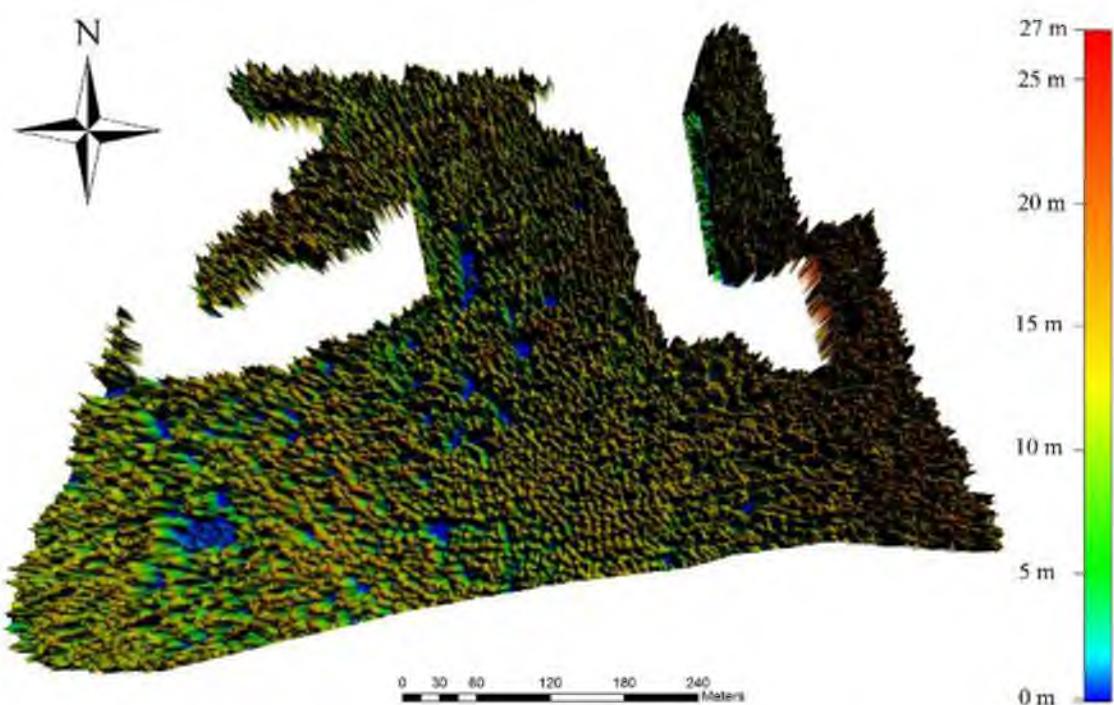


Рис. 3.12. Нормалізована висота рослинного покриву

Різниця висоти між точкою локального максимуму і точкою основи (надирна точка) розглядалася як нормована висота точки, тобто абсолютна висота дерева. Зауважимо, що локальні максимуми зі значеннями висоти нижче 4 метра були вилучені, тому що їх можна віднести до категорії жердняку з діаметром стовбура менша 4 см [28], кущів, помилок алгоритму тощо.

Г. Крафт [100] запропонував класифікувати дерева за ступенем росту та розвитку крони: I клас – виключно розвинуті дерева з найкращим ростом і розвитком крони; II клас – добре розвинуті дерева (панівні) із нормальним розвиненою кроною, добрым ростом; III клас – помірно розвинуті дерева, крони близькі до дерев II класу, але слабкіші, дещо звужені, з частково всихаючими гілками; IV клас – заглушенні дерева з ослабленим ростом, крони зжаті з усіх сторін; V клас – дерева, крони яких знаходяться під наметом.

Відповідно до цього твердження, ще одним важливим показником дерева є розвиненість крони. Тобто, визначення геометричних параметрів крони за даними лідара можуть бути корисні для побудови регресійного рівняння та виступати як потенційні регресори.

Розглянемо параметри крони, які вимірюються під час натурної таксації для підрахунку компонентів фітомаси, більш детально [101]. До основних форм і розмірів крон дерев, їх габітусних величин відносяться: поперечник або ширина крони, довжина крони та висота крони до найбільшої ширини крони.

Верхівка крони – це найвища точка дерева.

Основа крони – це нижня межа її живої частини. В процесі її визначення враховуються всі гілки за виключенням пагонів на стовбурі та поодиноких гілок, які не мають помітного впливу на процеси росту дерева. Основа живої крони визначається шляхом проведення горизонтальної лінії по нижній частині найнижчого листя вираженої крони (звичайно – найбільші гілки в нижній частині крони) через стовбур.

Довжина (протяжність) крони – це відстань від верхівки до основи крони.

Відносна висота крони – вказується у відсотках, як співвідношення довжини крони до загальної висоти дерева. Важливий допоміжний показник, від величини якого залежить, наприклад, значення щільності крони.

Діаметр на висоті грудей – це діаметр дерева на висоті 1,3 метра. DBH вимірюється мірною вилкою (або рулеткою через периметр) з найвищого положення біля дерева. Якщо у стовбура на цій висоті зустрічаються будь-які нерівності, опукlosti, заглиблення чи гілки, вимірювався діаметр безпосередньо над ними, там, де форма стовбура набуває свого нормальноговигляду.

Окреслення крони у 2,5D-описі об'єкта проводилось з використанням методу автоматизованої ідентифікації ліній вододілів [54], більш детально про цей метод було описано в другому розділі. Для адаптації та реалізації цього методу для даних ЛД було використано інверсію значень ЦММ (iЦММ), тобто для збереження дійсних значень (без спотворень) піксела, в даному дослідженні значення пікселей ЦММ було помножено на -1. Це перетворення було виконане для максимального наближення ЦММ до географічного ландшафту. Таким чином, пік крони утворює впадину, а локальний мінімум слугує точкою гирла річки (індикатором водного басейну). Для кращого розуміння цього процесу на рис. 3.13 візуалізовано схему реалізації даного алгоритму.

ЦММ та локальні мінімуми слугували як вхідні дані для застосування алгоритму Watershed (Spatial Analyst) в ArcGIS 10.2. Результат сегментації крон зображенено на рис. 3.16, б.

Розмежування крони для 2D проводилось на основі використання полігонів Вороного (Voronoi polygons) у векторному вигляді навколо локальних максимумів. Результат визначення локальних максимумів та розмежування крон з використанням 2D-опису об'єкта відображенено на рис. 3.16 а.

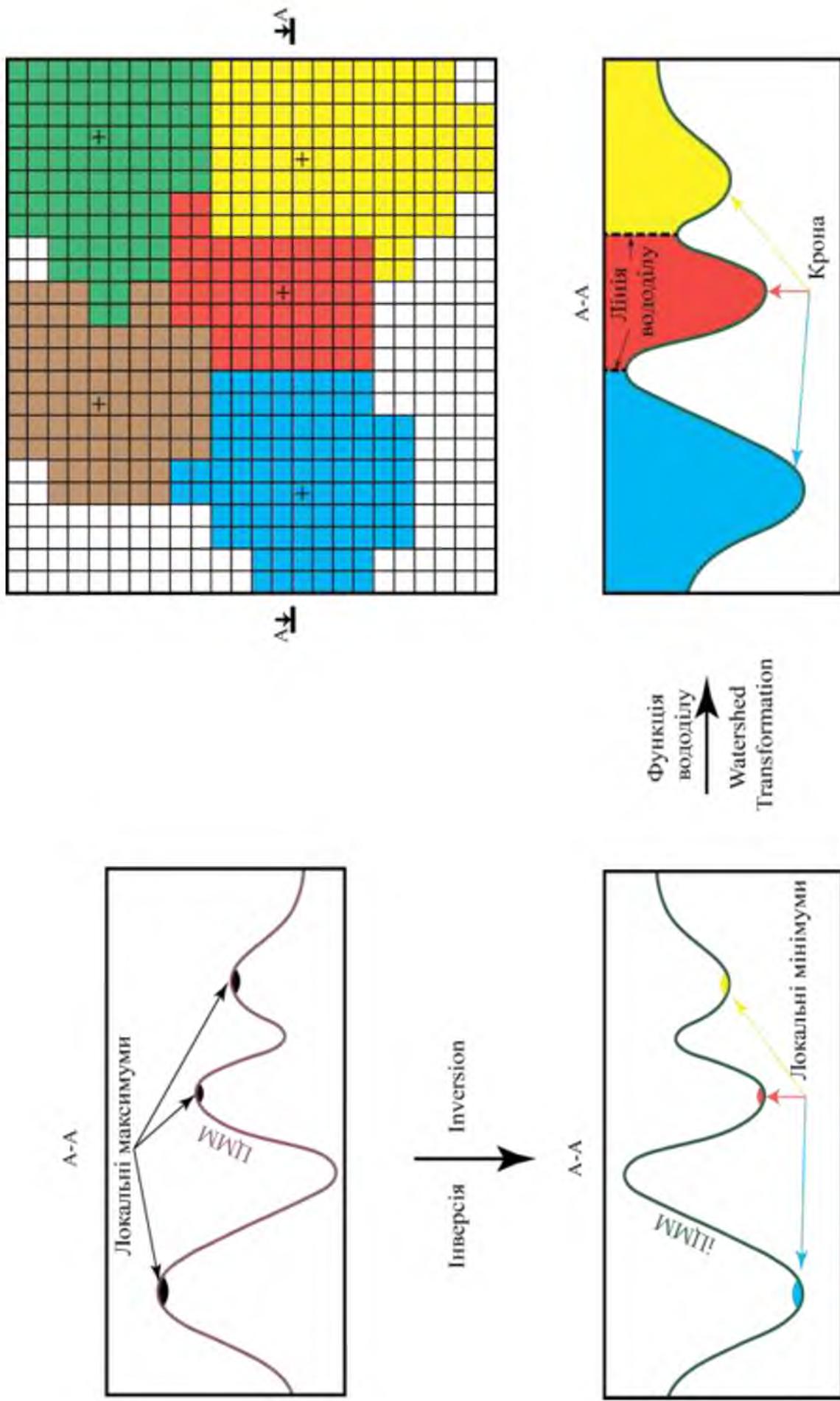


Рис. 3.13. Схема реалізації методу сегментації крон перетворенням вододілу

Виокремлення дерев у 3D-описі об'єкта проводилось на основі моделювання геометрії крони (див. алгоритм 5). Для точної класифікації за цим методом вирішальним чинником є визначення геометричної форми крони. У своїй роботі [102] Г. Самойлович запропонував класифікації форм крон дерев та виділив основні типи та підтипи геометричної форми крон.

Зауважимо, що геометрично змодельовані крони не можуть повністю описати всі типи дерев, тому що вони дуже варіюються. Однак більшість дерев одного типу мають схожу форму крони та можуть бути окреслені певним геометричним тілом (рис. 3.14). Для виділення хвойних дерев найкращі моделі, зображені в позиції *в*, *г*, *т*. В даному дослідженні було використано модель *г*.

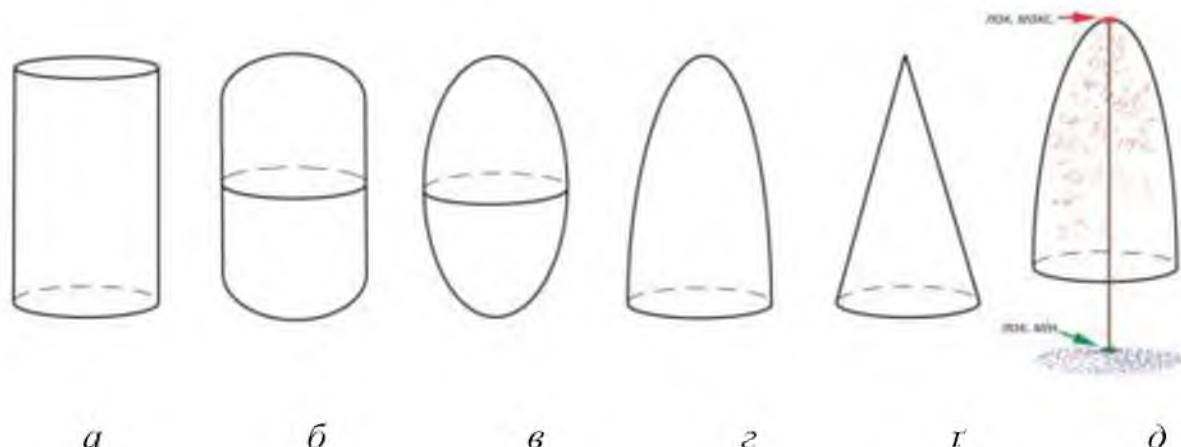


Рис. 3.14. Основні геометричні тіла для опису крон: *а* – циліндр; *б* – видовжений сфероїд; *в* – сфероїд; *г* – параболоїд; *т* – конус; *д* – наочний приклад кластеризації хмари точок лідара (синій колір – земля, червоний – рослинність)

Процес оброблення ЛД у 3D-описі об'єкта реалізовано за допомогою програмного забезпечення MicroStation компанії Bentley. Для аналізу було застосовано метод кластеризації k-means (метод k-средніх), алгоритм був модифікований і зупиняв свою роботу, коли відкласифіковані точки могли окреслити певне геометричне тіло (рис. 3.14 *д*).

Висота дерева при 3D обрахувалась безпосередньо з ЛД. Для визначення висоти дерев було нормалізовано ЛД (тобто координату Z було перераховано і приведено до 0 (рис. 3.15)). Результат виокремлення дерев і крон у 3D-описі об'єкта відображенено на рис. 3.16 в.

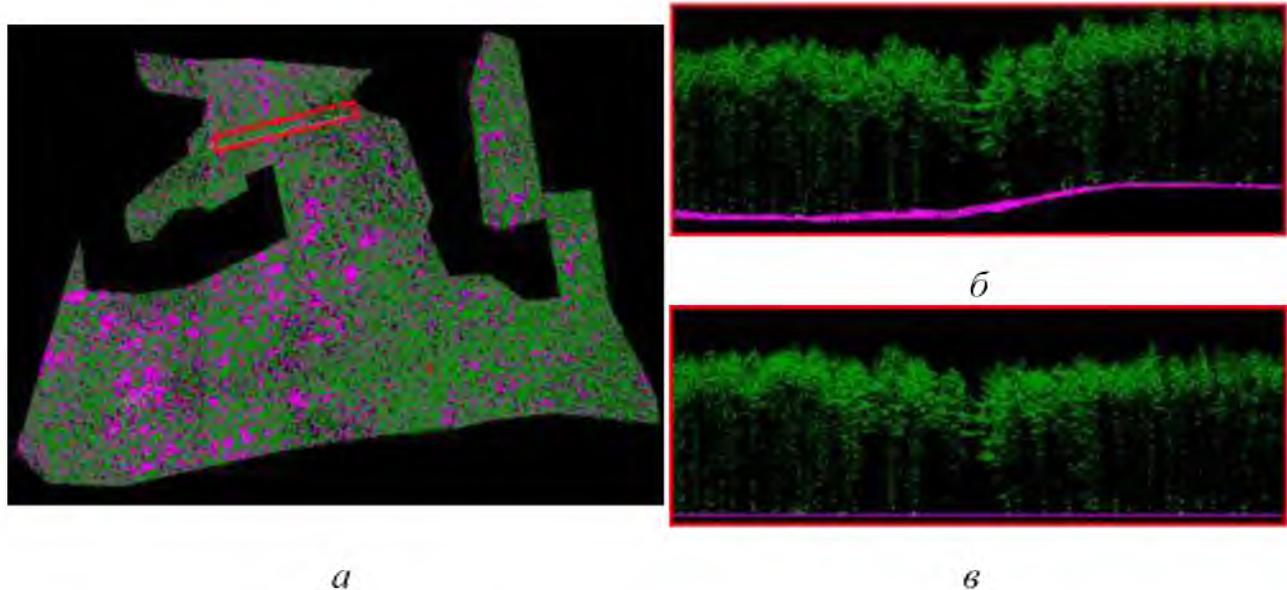


Рис. 3.15. Приведення до нуля значень Z хмари точок лідара: *а* – фрагмент території (червоний прямокутник територія профілювання); *б* – первинна хмара точок; *в* – нормалізована хмара точок.

Оцінка точності результатів оброблення даних.

На рис. 3.16 графічно відтворено результати оброблення ЛД, а у табл. 3.1 наведено результати виділення дерев у межах території дослідження.

Валідація результатів проводилась за використанням еталонних дерев, виявлених за допомогою методів фотограмметрії, а саме побудовою стереозображення та його візуалізацією анагліфічним методом [103]. При візуальному аналізі стереозображень були використані анагліфічні окуляри, в яких замість діоптрійних лінз вставлені спеціальні світлофільтри (для лівого ока – червоний, для правого – синій).

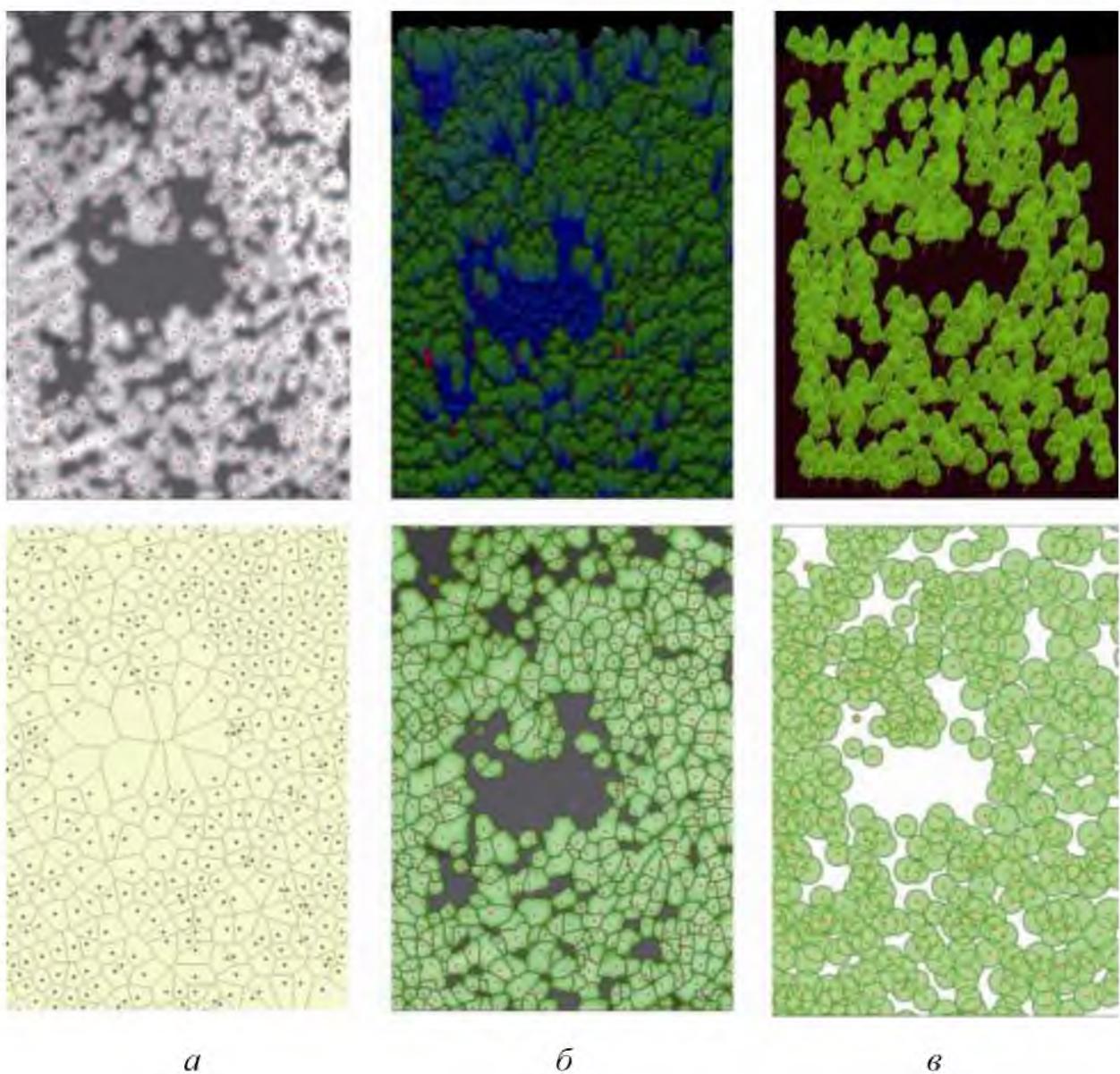


Рис. 3.16 Результат виділення дерев: *а* – 2D; *б* – 2,5D; *в* – 3D

Для виявлення еталонних дерев на території дослідження було обрано три довільні ділянки, приблизно по 40 кв. м кожна, де за допомогою анагліфічного зображення хмари точок ЛД вручну було виявлено 127 еталонних дерев. Основними критеріями при цьому були: чіткість крони еталонного дерева, наявність точок стовбурної частини дерева, значне зменшення щільності точок на землі.

Таблиця 3.1

Результати оброблення лідарних даних у трьох варіантах просторового опису об'єкта

Метод	Площа території дослідження, м ²	Кількість виявлених дерев	Середня висота дерев, м	Площа проективного покриття, м ² /%
2D	218973	3692	22,9	-
2,5D		5212	22,2	200221/91,4
3D		4299	23,1	197639/90,3

Перевірку результатів та оцінку точності здійснено на основі порівняльного аналізу просторового взаємозв'язку між визначеними та еталонними деревами. Результат приведено у табл. 3.2.

Оцінка точності виконувалась у середовищі ArcGIS з використанням набору інструментів «spatial analyst». У ході перевірки було виявлено основні типи помилок:

- помилкова тривога (FAE – False Alarm Error) – один з можливих результатів методу, коли дерево виявлено, але насправді його не існує;
- помилка місцезнаходження – різниця між значеннями x , y координат виявлених та еталонних дерев (TLE – Target Location Error);
- помилка визначення висоти – різниця між значеннями z координат виявлених та еталонних дерев (HME – Height Measurement Error).

Середньоквадратичну похибку розраховано за формулою:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}, \quad (3.1)$$

де n – кількість спостережень, a_i, b_i – атрибути референтних та визначених дерев.

Таблиця 3.2

Точність методів виділення дерев

Метод	Виявлено, од.	Виявлено, %	Не виявлено, од.	FAE, од.	RMSE TLE, м	HME RMSE, м
2D	70	55,1	57	2	0,92	1,63
2,5D	94	74,0	33	5	1,62	1,79
3D	69	54,3	58	0	0,78	1,42

Отже, згідно з даними табл. 3.2, найкращий результат виділення дерев у деревостані можна отримати із застосуванням методу 2,5D, але точніші за просторовими показниками способи 3D і 2D.

Втім, при використані полігонів Вороного у 2D виникає проблема окреслення крон та підрахунку проективного покриття. Опрацювання ЛД при 3D виявилося проблемним, час, затрачений на аналіз більше 10 млн точок ЛД сягав кілька годин. Ще однією проблемою алгоритму є його несталість, яка виражається у тому, що перезапуск алгоритму може давати різні результати на виході.

Однією з переваг застосування 2,5D-підходів є можливість застосування сегментації вододілу для окреслення крон, перевага якого є неправильність геометрії (наближеність до реальності) крони порівняно з розглянутими правильними геометричними тілами 3D-методом.

Очевидна перевага 2D і 2,5D-підходів над 3D-методом полягає у швидкості і мобільноті оброблення. Перші два методи легко поєднуються з іншою інформацією у вигляді раству тієї ж розмірності. Зате перевагою 3D-методу є можливість об'ємної візуалізації об'єкта для більш детального його вивчення.

Таким чином, після проведення аналізу основних сучасних методів автоматизованого виділення дерев зрозуміло, що для соснового деревостану найкращими є методи, засновані на опрацюванні ЦММ, тобто 2.5D-підходи. А саме, виявлення локальних максимів та окреслення крон за допомогою перетворення вододілу. Проте, при використані ЦММ неможливо виділення дерев у нижніх шарах лісу, де їх пригнічують домінуючі крони.

Ще одна причина невиявлення частини наявних дерев за допомогою 2.5D-підходів – це недосконалість алгоритмів згладжування. Тобто, якщо дерева мають тісну горизонтальну зімкнутість крон з приблизно однією висотою, під час згладжування поріг висоти між ними зменшується, що, в свою чергу, призводить до виявлення тільки одного локального максимуму, а їх повинно бути більше.

Таким чином, для удосконалення результатів виділення дерев за даними АЛЗ пропонується:

1. Покращити точність виділення дерев шляхом об'єднання 2.5D та 3D підходів.
2. Розробити алгоритм генералізації (зменшення) кількості лідарних точок без втрати інформативності при опрацюванні в 3D для потреб виділення дерев.
3. Використати альтернативний підхід при 3D аналізі.
4. Залучити додаткову інформацію для зменшення кількості помилок при 2.5D.

Висновки до розділу

1. У розділі наведено схему методу дистанційного визначення фітомаси за даними авіаційної лідарної зйомки.

2. Охарактеризовано територію дослідження, наведено описи наземних та дистанційних даних. Надано рекомендації щодо проведення необхідних наземних завіркових досліджень. Обґрунтовано та описано методику обробки лідарних даних.

3. Розглянуто три варіанти просторового опису об'єкта й алгоритми автоматизованого виділення дерев, які можна реалізувати з використанням геоінформаційних технологій. Наведено результати застосування обраних методів визначення морфоструктурних параметрів деревостану, а саме: встановлення кількості дерев на одиницю плоші, значень висоти дерев, розмежування крон, площ проективного покриття.

4. Проведено оцінку точності обраних методик на основі порівняльного аналізу просторового взаємозв'язку між визначеними та еталонними деревами. Показано, що найкращий результат при виділенні дерев у сосновому деревостані забезпечує метод, заснований на опрацюванні ЦММ, а саме виявлення локальних максимів у 2.5D. Експериментально виявлено, що за допомогою цього методу може бути виділено до 74% дерев.

5. Показано, що при застосуванні 2.5D-підходу є можливість, на відміну від 3D-підходу, застосування сегментації вододілу для окреслення крон, що дозволяє виокремлювати крони будь-якої геометричної форми і таким чином підвищувати точність аналізу.

6. Показано, що визначення таких просторових показників, як місце положення, висота дерева тощо, забезпечується при використанні 3D підходу.

7. Надано рекомендації щодо подальшого удосконалення існуючих методів автоматизованого виділення дерев шляхом об'єднання 2.5D та 3D підходів.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕРЕВОСТАНУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАДЗЕМНОЇ ФІТОМАСИ ЗА ДАНИМИ АВІАЦІЙНОЇ ЛІДАРНОЇ ЗЙОМКИ

4.1. Отримання параметрів деревостану на основі воксельного аналізу

Як було згадано в третьому розділі, кількість точок в ЛД може досягати десятки мільйонів. Відповідно їх опрацювання і візуалізація ускладнюються при використанні інтерфейсного програмного забезпечення. Тому доцільним є узагальнення хмари точок ЛД та їх генералізація.

4.1.1. Моделювання вокселів з лідарних даних

Таким чином, враховуючи всі переваги і недоліки воксельної моделі, в даній роботі пропонується використати комплексну модель воксельної і векторної графіки. Тобто, за принципами вокселя створюється прямокутна сітка, але не способом растрізації, як пропонує у своїй роботі [104] С. Хегстром (S. Hagstrom), а методом генералізації та структуризації точок лідара з рівномірним розподілом точок в тривимірному просторі з певним кроком, наприклад, через один метр. Для даної мети був написаний код на мові програмування Python. Він представлений у додатку Б.

Для роботи коду в якості вхідних даних служить текстовий файл з кодуванням ASCII з розширенням *.xyz. Файл містять координати x , y і z у форматі з плаваючою точкою (float), при цьому кожен рядок характеризує окрему точку. Загалом цей формат часто використовують для збереження просторової інформації, а також використовується рядом програм для роботи з тривимірною комп’ютерною графікою. Крім того, цей формат є батьківським форматом запису ЛД до впровадження формату *.las (див. розділ 1). Тому всі програми, які працюють з ЛД, легко імпортують та експортирують даний формат.

Зазначимо, що перед використанням коду краще провести нормалізацію ЛД. Відповідно до проведеного в третьому розділі аналізу методів визначення висоти об'єкта, безпосередня нормалізація ЛД дала точніші результати, ніж нормалізація ЦММ.

Наступним значенням, який потребує код, це крок генералізації (інтерполяції); за замовчуванням він складає один метр. В результаті отримуємо новий текстовий файл з розширенням *.xyz1, який містить не тільки координати x , y , z , але й значення інтенсивності. В нашому випадку значення інтенсивності дорівнює кількості (щільності) точок, які були включені (генералізовані) для кожного вокселя. Результат застосування цього коду представлено на рис. 4.1.

Головною перевагою застосування і аналізу модифікованої хмари точок за допомогою цього коду є:

- інформація в даному випадку не растроується;
- кожен елемент не являється вокселем, а швидше псевдовокселем, тому що виконуються вимоги до векторної графіки, а саме координати кожного елементу та його розмір (на відміну від воксела, що має не просторові координати, а тільки положення в матриці значень);
- для кожного елементу можливо присвоєння будь-якої атрибутивної інформації (в коді представлено тільки щільність точок лідара під час генералізації). Всю іншу інформацію, що представляла інтерес, було отримано із застосуванням інструментів просторового та 3D аналізу програмного середовища ArcGIS;
- всі елементи мають чітку геометричну структуру, тобто розміщені з однаковим кроком в тривимірній площині;
- кількість точок значно зменшується в залежності від вибору рівня генералізації. В даній роботі пропонується використовувати розмір генералізації в 0,5 метра (рис. 4.1 e);

- результат легко інтерпретується та конвертується в формати *.las чи *.shp тощо, або навіть у воксельний формат *.vox.

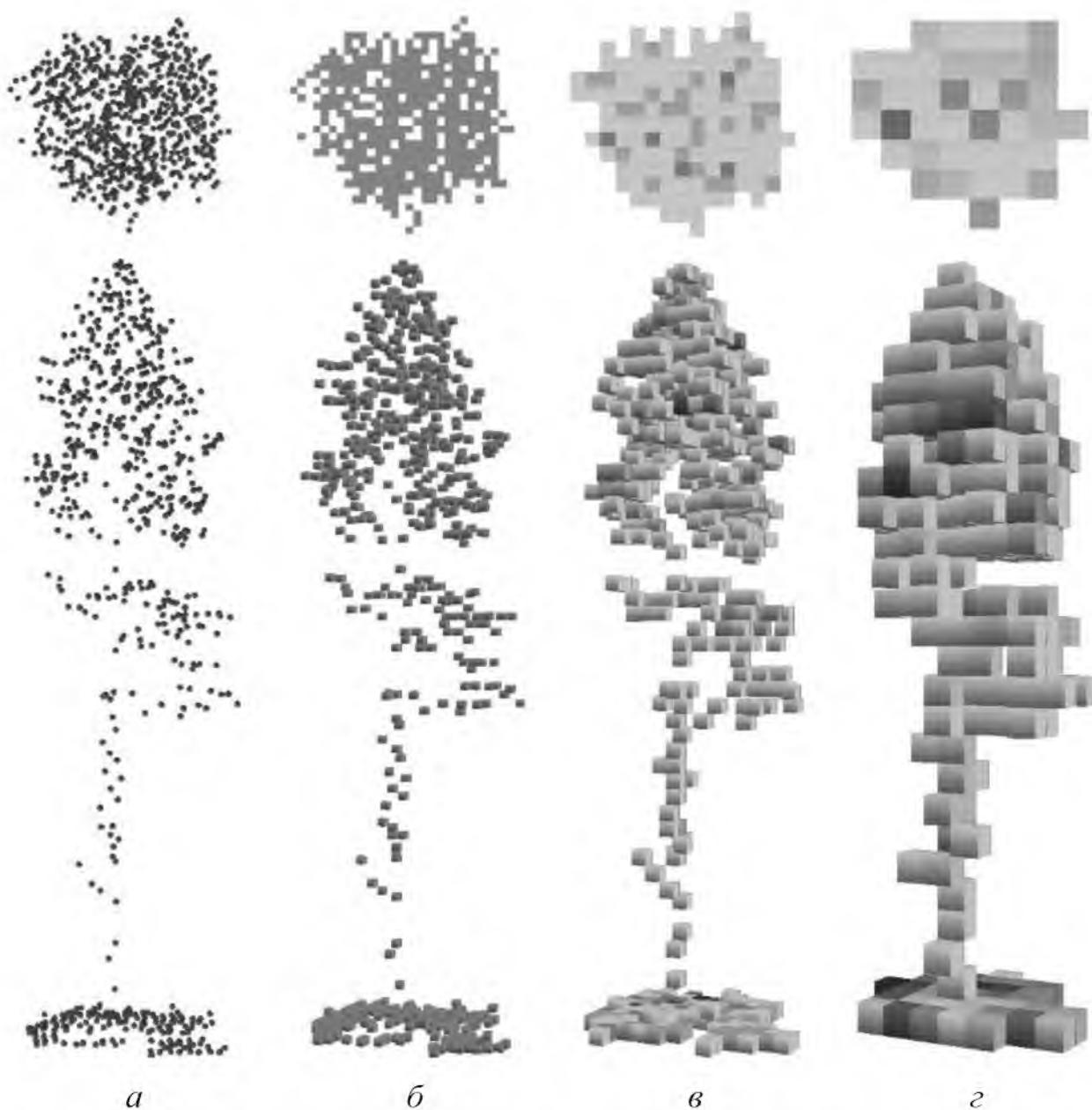


Рис. 4.1. Результат застосування коду (вигляд зверху та з боку): *а* – хмара точок лідара (вхідні дані); *б* – розмірність воксела 25 см; *в* – розмірність воксела 50 см; *г* – розмірність воксела 100 см.

Отже, головним завданням написання цього коду було: збільшити точність автоматизованого виділення дерев (з використанням тривимірного аналізу), що були пригнічені домінуючими кронами або не мали чітко

виражених локальних максимумів; полегшення визначення параметрів крони, а саме протяжність та об'єм.

4.1.2. Метод автоматизованого виділення дерев за допомогою воксельного аналізу

Завдяки тому, що на території дослідження немає розвинених нижніх ярусів, в тому числі підліску, в багатьох випадках лідарний імпульс дістався через крони до стовбурної частини (див. рис. 4.1). Тому в даному випадку пропонується аналізувати отриману хмару точок не з верхньої частини лісу, як при аналізі 2,5D, а навпаки – з нижньої частини.

Для реалізації запропонованого методу отримані графічні елементи переводяться в растроїй вигляд, тобто векселі, оскільки послідовні кроки потребують растрової моделі для подальшого опрацювання. Зазначимо, що при переведені в растроїй вигляд багатьом вокселям надано спеціальне значення NoData (Немає даних). NoData вказує на те, що для встановлення значення в цій комірці не було даних або було недостатньо даних. Будь-які математичні операції, що взаємодіють зі значенням NoData в результаті дають також NoData. Тому для всіх векселів із значеннями NoData було призначено нуль – як математичне число для ведення подальших підрахунків.

Метод включає в себе пошаровий аналіз даних, наприклад, спочатку розглядається перший шар вокselів, тобто на висоті від 0,5 до 1,0 м над землею, потім 1,0–1,5 м і так далі до z_{\max} . Суть методу полягає в поступовому нарощуванні ділянок для одержання замкнутих контурів піdob'єктів.

Для реалізації даного методу використовується функція пошуку та аналізу околу (сусідства) пікселів (Neighborhood searching), принцип дії цього алгоритму описано у фільтрації растру п 2.2.

У випадку з 3D (порівняно з 2D), традиційний район пошуку суміжних пікселів розширюється [105]. При використанні сітки вокselів додаються ще кілька правил сусідства, тобто сусідні воксели зверху і знизу та похідними

від них (дотичні в ребрах та точках). На рис. 4.2 представлено всі можливі варіанти сусідства в 3D.

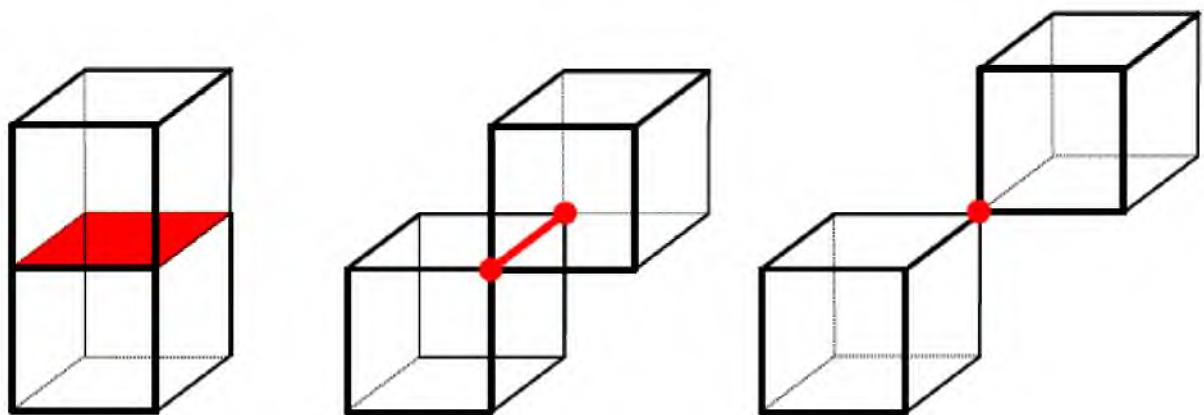


Рис. 4.2. Правила сусідства при воксельному аналізі

Візуалізація процесу виділення дерев за допомогою аналізу вокселів схематично зображенено на рис. 4.3.

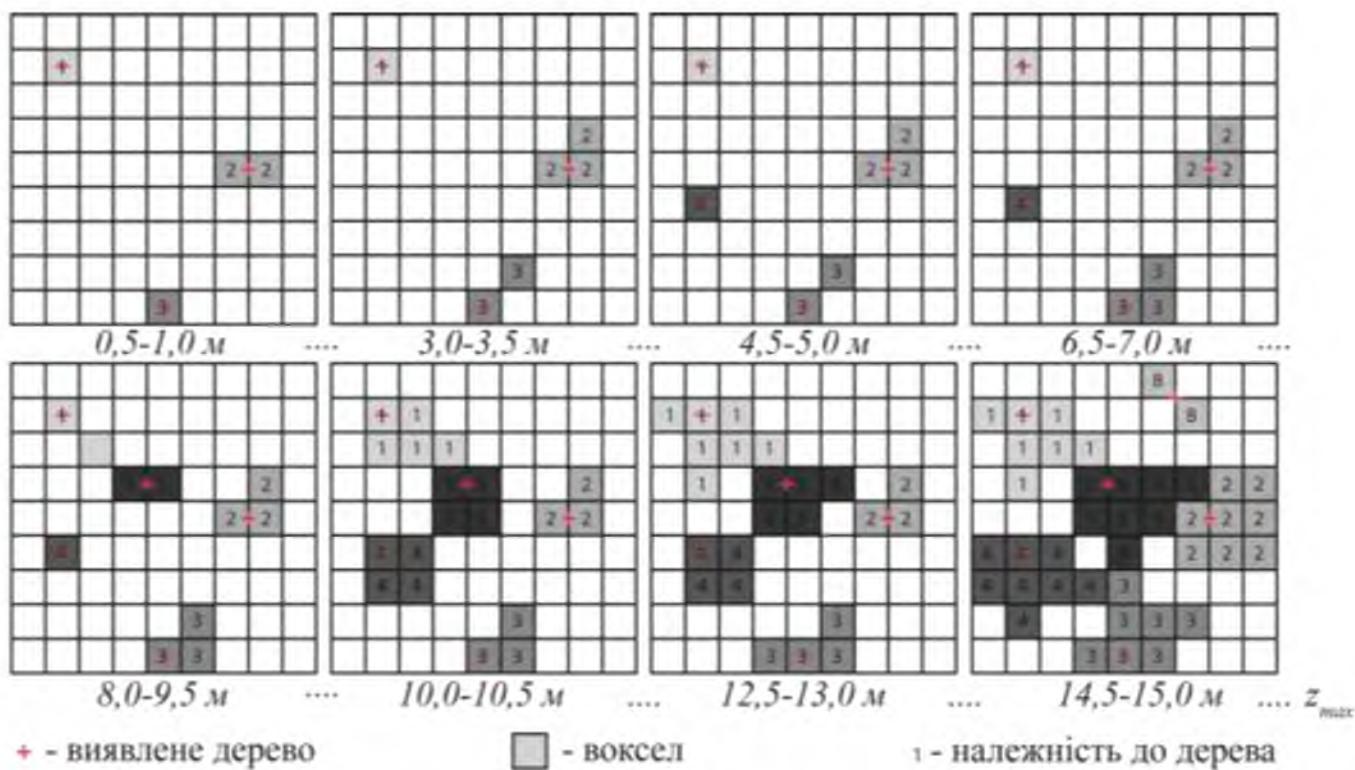


Рис 4.3. Візуалізація процесу виділення дерев за допомогою воксельного аналізу

Спочатку аналізується перший шар, для кожного вексела задається унікальний послідовний номер (count), при аналізі наступних шарів вокселя, при наявності сусідніх вокselів їм присвоюється цей атрибут (номер). Якщо немає – то новому пікселу присвоюється новий порядковий номер. Алгоритм завершує свою роботу, коли всім вокселям було присвоєно певний атрибут або коли досягнуто останнього шару векселів (рис. 4.3).

Варто зауважити, що виділення дерев за допомогою воксельного аналізу може виступати як самостійний метод виділення дерев у 3D, так і в комплексі з іншими методами. В нашому випадку він є доповненням для покращення результатів та точності виділення дерев при аналізі ЛД із застосуванням 2,5D підходів. Тобто локальні максимуми дерев, виявлені на основі аналізу ЦММ, були доповнені результатом опрацювання вокселя. Після об'єднання результатів отримані дерева, які знаходились занадто близько один до одного, були видалені на основі критерію пошуку *найближчої відстані*. У даному дослідженні було вирішено використовувати поріг у 2,0 м, у відповідності до середньої щільності дерев за даними польових досліджень.

4.1.3. Метод розрахунку об'ємних показників крони на основі воксельного аналізу

Маючи «додаткові» дані про місцезнаходження дерев, було проведено повторне окреслення крон за допомогою трансформації вододілу (алгоритм окреслення меж крони було описано в третьому розділі). Отримані крони слугували вхідними даними для подальшого аналізу.

Наступним кроком було визначення інших параметрів крони, а саме протяжність та об'єм. Вхідними даними в цьому випадку слугували векторні просторові дані, тобто точки, які були отримані після застосування коду, були переведені у векторний формат файлу типу *shp.

Для подальшого аналізу потрібно вирішити завдання з присвоєння належності кожного векторного елемента до дерева. Для даної мети було використано інструмент SpatialJoin модулю AnalysisArcGIS, цей інструмент визначає просторовий взаємозв'язок між заданими просторовими об'єктами. Тобто, після застосування інструменту SpatialJoin кожному векторному вокセルю, що окреслюється певною кроною, було присвоєно унікальний (ідентифікаційний) номер дерева до якого він відноситься. Це дозволило побудувати діаграму розподілу кількості векселів на різних висотах (рис. 4.4). Як видно, цей розподіл близький до нормального закону.

Основою крони можна вважати векторні воксили за умови, коли їх щільність в одній площині Z більше трьох векселів та з обов'язковим послідовним зростанням ввищих шарах, тобто виконується умова нормального розподілу. Результат класифікації елементів дерева зображен на рис. 4.4.

Протяжність крони дерева було визначено за формулою:

$$H_{L_{Cr}} = H_{T_{Cr}} - H_{B_{Cr}}, \quad (4.1)$$

де $H_{T_{Cr}}$ – верх крони; $H_{B_{Cr}}$ – основа крони.

Відношення висоти крони до висоти дерева було розраховано за формулою:

$$P_{L_{Cr}} = \frac{H_{T_{Cr}} \times 100}{H_{tree}}, \quad (4.2)$$

де H_{tree} – висота дерева.

Об'єм крони було обчислено за формулою:

$$V_{Cr} = \sum VXL_{Cr} \times H_{vox}^3, \quad (4.3)$$

де VXL_{Cr} – векселі, що відносяться до класу крони; H_{vox} – довжина сторони вокселя.

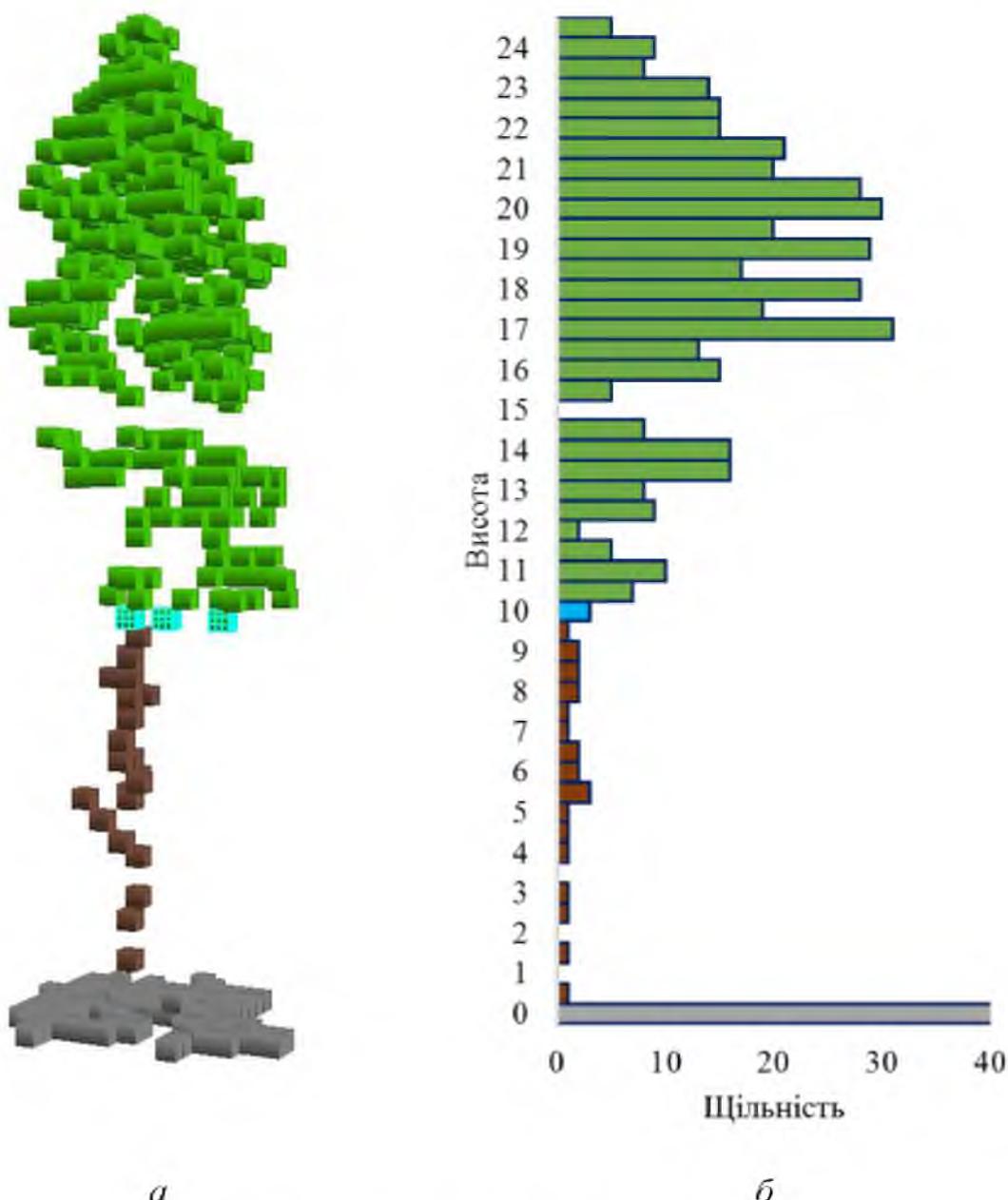


Рис. 4.4. Класифікація елементів дерева: *а* – приклад розбиття на класи (сірий – ґрунт, коричневий – стовбур; зелений – крона, в тому числі синій – основа крони); *б* – щільність вокselів

4.2. Метод оцінювання індексу листкової поверхні

Одним з основних показників активності процесів фотосинтезу рослинністю є індекс листкової поверхні LAI. Цей індекс може виступати не тільки як потенційний регресор у побудові рівняння при визначенні діаметра стовбура, але і як кількісний показник фотосинтезуючої здатності листя чи хвої. Тому розглянемо можливість оцінювання індексу листкової поверхні на

заданій території за даними авіаційної лідарної зйомки. Скористуємось для цього схемою, представленою на рис. 4.5.

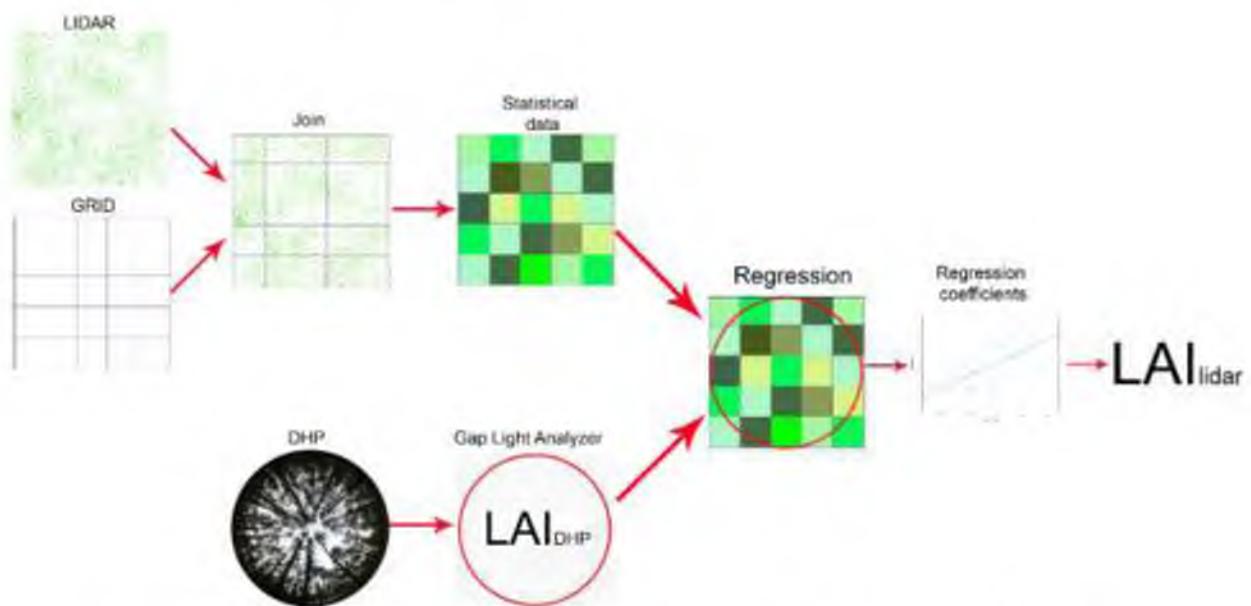


Рис. 4.5. Схема оцінювання LAI за даними авіаційного лідара

Згідно з схеми, цифрове оброблення фотографій DHP та ЛД здійснюється окремо і незалежно.

Оброблення даних DHP проводилося програмним продуктом Gap Light Analyzer (GLA). За його допомогою кожне зображення DHP (рис. 4.6 а) розділялося на три псевдоканали, що спільно утворюють RGB-представлення (червоний, зелений та синій), з яких далі відбиралася канал з найбільшою інформативністю. У якості такого був відбраний синій канал, оскільки він, як показано в [106, 107], забезпечує найбільш чітке розмежування між рослинністю, небом і змішаними пікселями, тому що фотосинтезуючі фтоелементи (листя, голки) мають набагато менший коефіцієнт відбиття і пропускання в синій області оптичного спектру. У бінарному вигляді це зображення представлено на рис. 4.6 б. Використовуючи це зображення програма GLA дозволила автоматично виділити прогалини, оцінити їх площині, провести інші необхідні обчислення і на виході видати оцінку LAI.

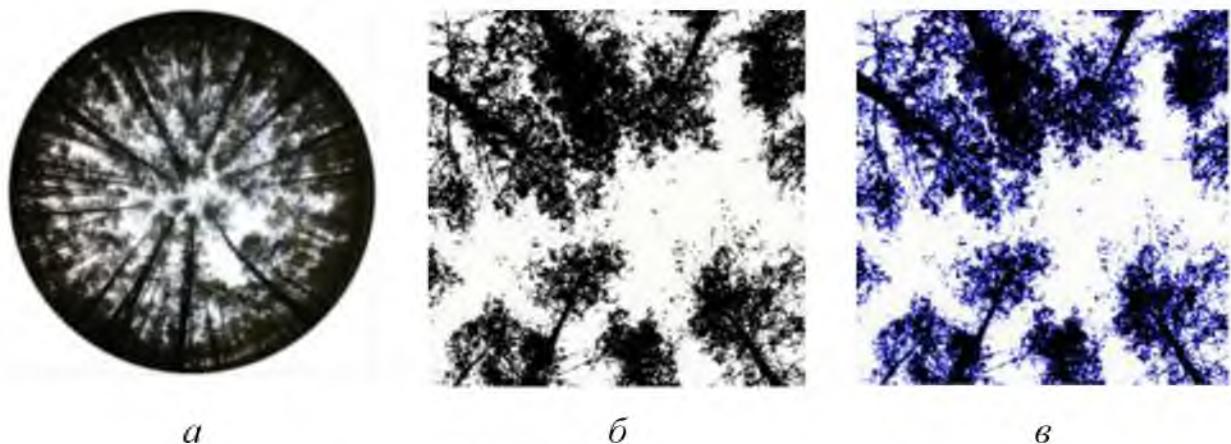


Рис. 4.6. *а* – фотографія DHP; *б* – бінарне зображення у синьому діапазоні; *в* – результат оброблення бінарного зображення програмою GLA (чорний колір – рослинність, білий – небо, синій – суміжні піксели)

Обчислення LAI проводилися програмою GLA у двох варіантах:
 1) аналізується розподіл випромінювання в межах просторового кута $\pm 60^\circ$;
 2) аналізується розподіл випромінювання в межах просторового кута $\pm 75^\circ$.
 Результат, що отримується у першому варіанті, позначається в програмі GLA як LAI4, другий результат – як LAI5 [120].

Для зменшення помилки для будь-якого з методів у дослідженні оцінка величини індексу за даними лідару обчислювалась як середнє цих двох результатів:

$$LAI_{DHP} = \frac{LAI4 + LAI5}{2}. \quad (4.4)$$

Згідно схеми на рис. 4.5, наступним етапом оброблення ЛД було визначення математичних змінних (регресорів) для побудови рівняння множинної регресії [21]. Для цього, на територію дослідження спочатку було побудовано сітку (grid) з кроком 1 x 1 м. Проте виявилося, що у багатьох випадках кількість лазерних точок в чарунці такого розміру була менше 10, що впливало на точність значень отриманих змінних; тому було вирішено збільшити розмір кроку сітки до 3 м. Після об'єднання (join) сітки та ЛД для

кожної чарунки було визначено математичні і статистичні параметри (табл. 2.1).

Крім того, у якості регресора може виступати індекс проникнення лазерного випромінювання (Laser Penetration Index – LPI), який визначається за формулою [109]:

$$LPI = \frac{Gr_{DNS}}{Gr_{DNS} + Veg_{DNS}}. \quad (4.5)$$

На рис. 4.7 показано розподіл цього індексу на територію дослідження; тут значеннями LPI, близькими до 0, відображені ділянки з густою рослинністю, зі зростанням значень LPI збільшується рівень відкритості місцевості.

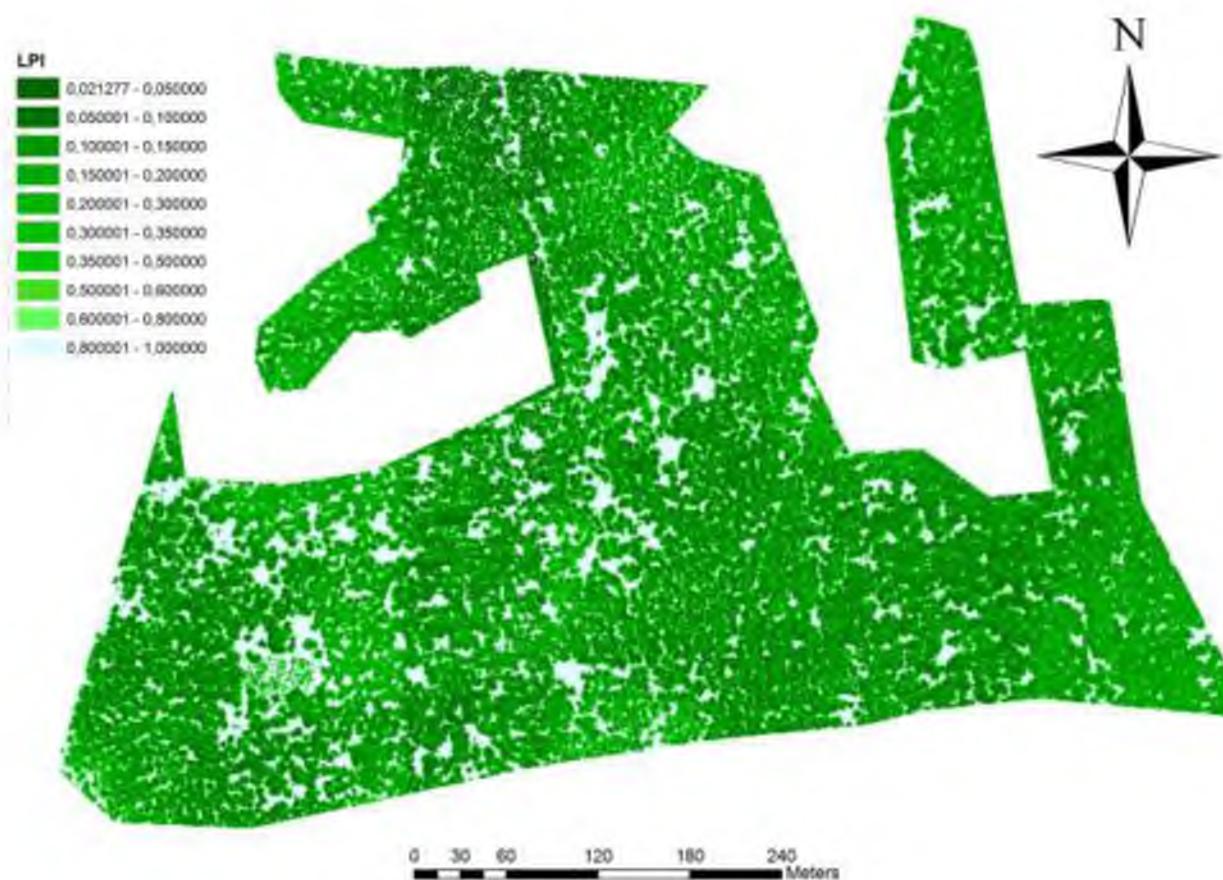


Рис. 4.7. Розподіл індексу LPI на території дослідження.

Таким чином, маючи ряд регресорів, постає питання, як відібрати найбільш інформативну їх сукупність з числа всіх можливих. Для вирішення цього було застосовано метод послідовного виключення [90]. Розрахунки коефіцієнтів регресії проводилися із застосуванням методу найменших квадратів, що пов'язано з двома його перевагами: 1) він не потребує знання закону розподілу досліджуваних змінних; 2) він досить добре опрацьований та зручний під час обчислень.

Суть методу послідовного виключення полягає у тому, що спочатку в модель множинної регресії включаються всі можливі регресори (їх кількість p береться максимальною).

Далі, за допомогою певного критерію (у досліженні був використаний F-критерій) оцінюється внесок кожного регресора в підвищення точності. Якщо найменше значення критерію менше за обране попередньо деяке критичне значення, то відповідна змінна виключається з моделі (величина p зменшується на одиницю). Модель перераховується і знову обчислюється значення частинного F-критерію з порівнянням з критичним значенням і т. д. Процедура формування інформативної сукупності регресорів закінчується тоді, коли отримане найменше значення критерію буде більшим за критичне.

Зазначимо, що аналіз всіх змінних і вибір найбільш інформативних регресорів за описаними вище правилами був проведений з використанням програмного забезпечення JMP SAS software.

При побудові регресійної залежності кожний з цих параметрів може розглядатися як регресор.

На рис. 4.8 у формі блочної матриці зображені зв'язок діаграм розсіювання обраних регресорів та коефіцієнту детермінації. Інші регресори не показали прийнятної кореляції з LAI_{DHP} .

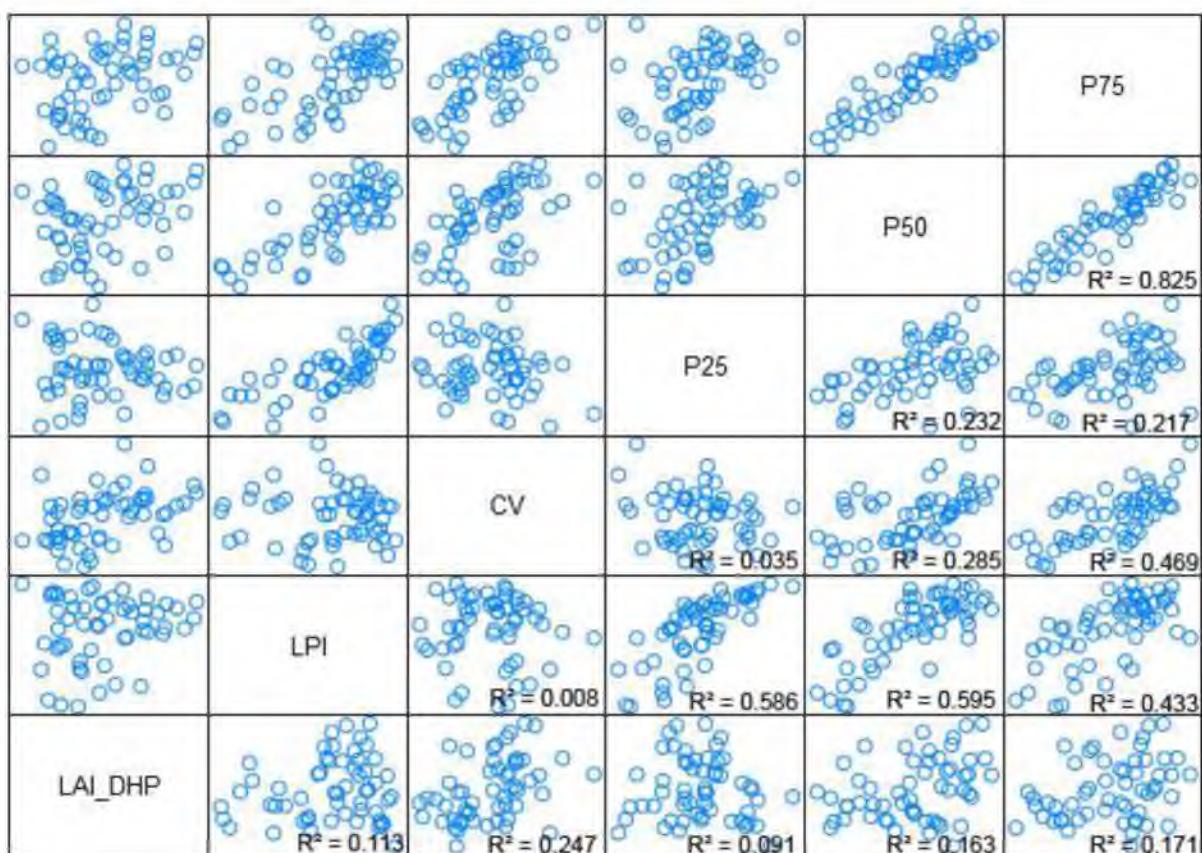


Рис. 4.8. Матриця індивідуальної кореляції

За результатами проведеного нами аналізу найбільш інформативними для побудови рівняння множинної регресії виявилися: CV (тобто $stdev/min$), LPI та процентилі P25, P50, P75, P90, P95.

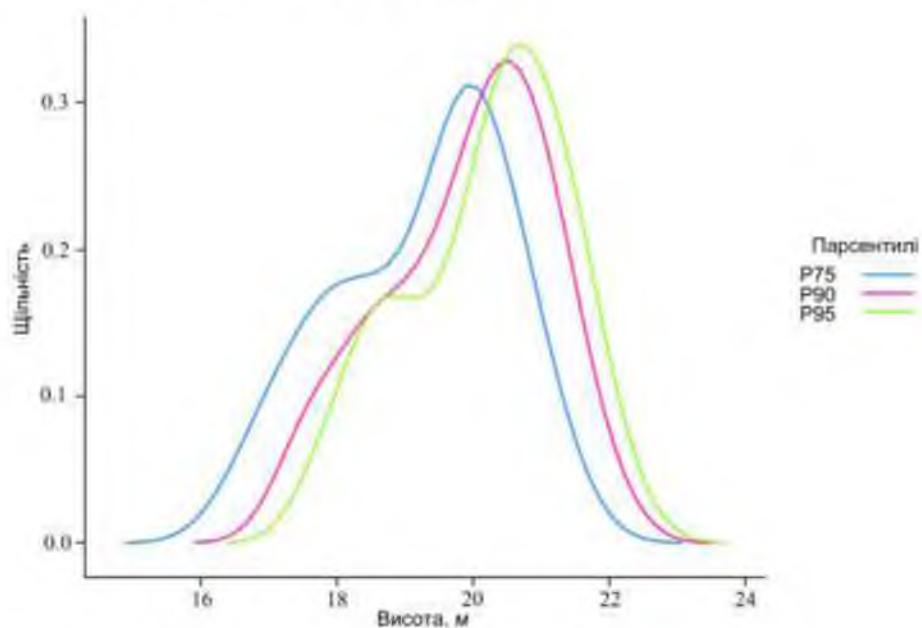


Рис. 4.9. Графік щільності значень

Проте, проаналізувавши останні три процентилі P75, P90, P95 (рис. 4.9), виявилось, що їх значення практично дублюють один одного. Тому було вирішено до рівняння множинної регресії включати тільки один з них – P75, як верхній квартель.

Далі були розраховані, з використанням методу найменших квадратів, коефіцієнти при відібраних регресорах і, в результаті, рівняння множинної регресії отримало вигляд:

$$LAI_{UDAR} = -1.14 + 3.31 \cdot LPI + 0.38 \cdot h_{CV} - 0.00766 \cdot h_{P25} - 0.02 \cdot h_{P50} - 0.14 \cdot h_{P75}. \quad (4.6)$$

Для оцінки точності було підраховано коефіцієнт детермінації ($R^2=0,638$) та середньоквадратичне відхилення коефіцієнта регресії від його істинного значення (RMSE=0,0964).

Аналіз рис. 4.10 підтверджує наявність тісного кореляційного зв'язку між наземними (одержаними шляхом фотографування неба через навіс) та дистанційними (за допомогою лідарних даних) оцінками LAI.

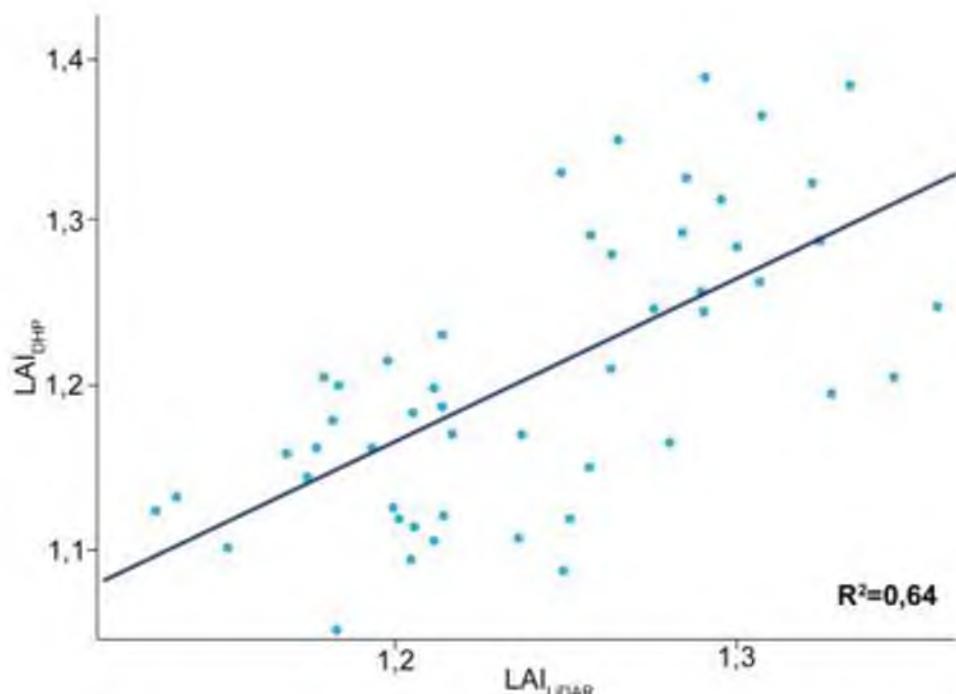


Рис. 4.10. Лінійна регресія зв'язку між наземним та дистанційним оцінюванням LAI.

На рис. 4.11 зображено результат оцінки LAI на територію дослідження з використанням одержаної регресійної моделі на момент проведення лідарної зйомки.

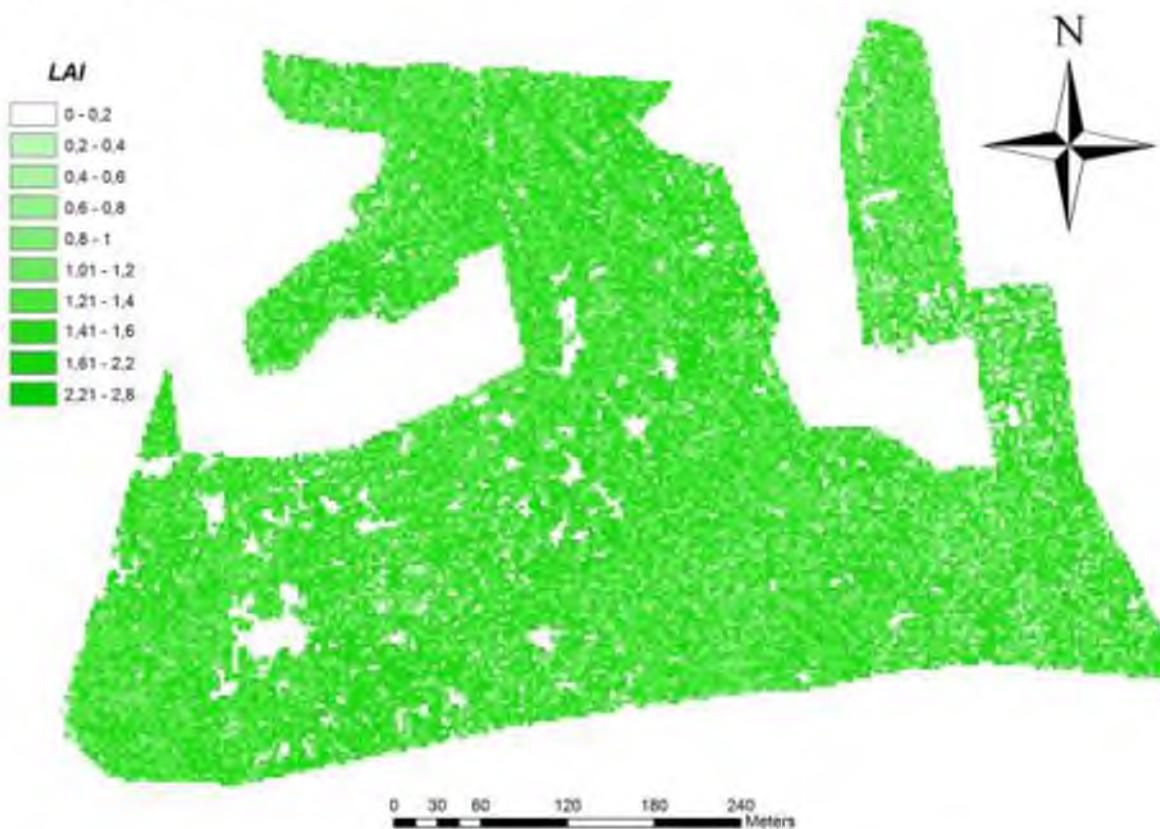


Рис. 4.11. Розподіл оцінок LAI на територію дослідження

4.3. Метод розрахунку діаметра стовбура на висоті грудей

Розрахунок діаметра стовбура на висоті грудей за даними АЛЗ здійснювався за такими етапами:

- опрацювання наземних лазерних даних та підрахунок діаметра стовбура на висоті грудей (DBH_{TLS});
- підбір і аналіз регресорів, що істотно впливають на результативність розрахунку DBH з використанням даних АЛЗ (DBH_{LiDAR});
- оцінка впливу окремих факторів;
- визначення форми рівняння множинної регресії;
- перевірка якості та адекватності рівняння.

Як і у випадку з LAI, діаметр стовбура на висоті грудей, що отримується за допомогою даних АЛЗ, будемо шукати через побудову множинної регресії у вигляді:

$$y_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_p x_{ip}; \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.7)$$

де y_i – шукане значення DBH_{LiDAR} ; x_1, x_2, \dots, x_p – незалежні регресори; b_0, b_1, \dots, b_p – коефіцієнти регресії; p – кількість регресорів; n – кількість вимірювань; $n >> p$.

Як було згадано в попередньому розділі, визначення діаметру стовбура безпосередньо в лісі сталими таксаційними методами є досить трудомістким завданням. Ще одним недоліком використання сталих методів є точність отримання просторового положення кожного дерева, яка є досить низька для використання цих даних як еталонних для побудови рівняння залежності між польовими та дистанційними методами визначення DBH . Для вирішення недоліків розрахунку діаметра стовбура на висоті грудей сталими таксаційними методами було вирішено використовувати дані наземного лазерного сканування.

Процес опрацювання наземних лазерних даних починається з класифікації хмари точок на два класи GrtaVeg. Варто зауважити, що принцип формування даних TLS та ЛД подібний, тому методи аналізу та програмне забезпечення для опрацювання TLS були однакові. Після класифікації хмару точок TLS було нормалізовано, для видалення впливу рельєфу при визначенні висоти 1,3 м. Наступним кроком було виділено та виокремлено точки, що знаходяться на висоті від 129 до 131 см над Gr. Подальший аналіз включав в себе побудову кіл стовбура навколо даних, але при реалізації цього ручним методом зайняло досить довгий час. Тому для визначення діаметрів дерев використали алгоритми апроксимації кола (рис. 4.12, б) в арифметичному варіанті [110]. Для реалізації даного алгоритму було використано інструмент “Minimum Bounding Geometry” ArcGIS.

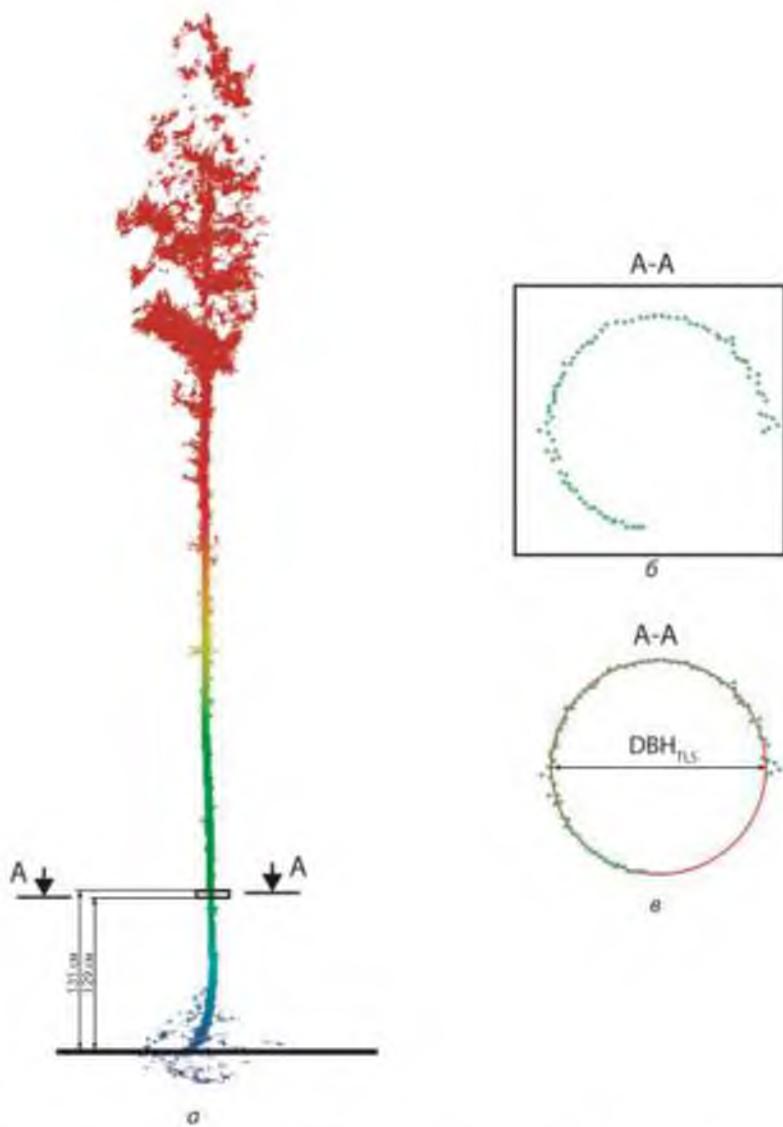


Рис 4.12. Приклад визначення діаметру стовбура: а – дані наземного лазерного сканування; б – виокремлені точки TLS; в – результат апроксимації кола

Наступним етапом для побудови рівняння був підбір регресорів, що істотно впливає на результативність розрахунку DBH_{LiDAR} . Для одержання надійних розрахунків DBH у модель не слід включати багато регресорів. Проблема розмірності моделі зв'язку, тобто визначення оптимального числа регресорів, є однією з основних проблем побудови множинного рівняння регресії [91]. Проте, чим більше регресорів включено в рівняння, тим воно краще описує шукане значення. Однак, модель великої розмірності складно реалізовується і потребує багато часу на підрахунок кожного регресора.

Скорочення розмірності моделі за рахунок виключення другорядних (неістотних) чинників сприяє якості та простоті рівняння. В той же час побудова моделі регресії малої розмірності може привести до того, що така модель буде недостатньо адекватно описувати шукане значення DBН. Тому підбір регресорів для рівняння є досить кропітким та важливим завданням.

Найбільш прийнятним способом відбору регресорів є метод крокової регресії (кроковий регресійний аналіз) [90, 92]. Для регресійних моделей існує кілька по-крокових процедур (stepwise) відбору регресорів: процедура послідовного приєднання, процедура приєднання-видалення та процедура послідовного видалення. В нашому випадку було використано процедуру поступового приєднання регресорів до моделі.

Суть методу полягає у послідовному включені до моделі регресорів доти, поки модель не стане «задовільною». Порядок включення факторів до моделі підбирається на основі значень коефіцієнтів парної кореляції між значеннями DBH_{TLS} і залежними змінними моделі.

Алгоритм методу містить таку послідовність дій. Спочатку розраховується кореляційна матриця r для усіх регресорів моделі, які планується включити до моделі. Потім з кореляційної матриці вибирається і включається до моделі той регресор $x_i, i = \overline{1, n}$, якому у кореляційній матриці відповідає найбільший за модулем коефіцієнт парної кореляції з залежною змінною моделі у x_1 . Будеться регресійне рівняння з однією незалежною змінною, так звана модель першого наближення:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1. \quad (4.8)$$

Після цього перевіряється значимість рівняння за коефіцієнтом детермінації і за частковим F-критерієм.

На основі аналізу кореляційної матриці серед тих регресорів, що залишилися, шукаємо новий регресор x_2 , який має найбільший за модулем

коєфіцієнт кореляції з у і включаємо її до моделі. Будується нове рівняння регресії:

$$\tilde{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2. \quad (4.9)$$

Аналізується зміна цих показників у порівнянні з попередньою моделлю. Потім розраховуються часткові F-критерії для кожного регресора. Серед них обирається найменше значення і порівнюється із заздалегідь обраним критичним значенням F-критерію. В залежності від результатів перевірки додана на цьому кроці змінна, або залишається у моделі, або відкидається. Після цього модель перераховується, в залежності від факторів, які залишилися та ітерація продовжується. Процес побудови моделі за наведеним алгоритмом припиняється, якщо жодний фактор, що знаходиться у поточному рівнянні, не вдається виключити, а новий претендент на включення не відповідає частковому F-критерію.

Результати здійсненого кореляційного аналізу свідчать про те, що більшість визначених морфологічних та біофізичних параметрів дерева на основі застосування ЛД перебувають у тісній кореляційній залежності з діаметром стовбура дерев, розрахованих з наземного лазерного сканування. Результат розрахунку коефіцієнтів кореляції між основними математичними, статистичними та морфологічними показниками деревостану отриманими з опрацювання ЛД та діаметром стовбура на висоті грудей отриманих з TLS наведено в табл. 4.1. Зауважимо, що до таблиці включені тільки ті регресори, що мають зв'язок більше 20%. Варто додати, що найтіснішими регресорами виявилися параметри крони, але вони також мають дуже високий зв'язок між собою, тому не можуть бути включені до регресійної моделі.

Наступний крок після вибору регресорів – визначення форми рівняння регресії. В основу виявлення і встановлення аналітичної форми зв'язку покладене використання певних математичних функцій – лінійної, логарифмічної, ступеневої, експоненціальної, поліноміальної і деяких інших. Практично для обчислення параметрів DBH більшість математичних

функцій дали одинаковий результат, який варіювався в сотих дробу, тому було вирішено використати функцію лінійного регресійного аналізу як найпростішу та поширену.

Таблиця 4.1

Коефіцієнти кореляції між основними статистичними та морфологічними показниками деревостану

Показники	DBH	S_{Cr}	H_{tree}	V_{Cr}	H_{Lc}	P_{Lc}	LAI	Cr_{DNS}
Діаметр стовбура (м), DBH	1	-	-	-	-	-	-	-
Площа поперечника крони (м ²), S_{Cr}	0,73	1	-	-	-	-	-	-
Висота дерева (м), H_{tree}	0,26	0,14	1	-	-	-	-	-
Об'єм крони (м ³), V_{Cr}	0,68	0,89	0,18	1	-	-	-	-
Довжина крони (м ²), H_{Lc}	0,28	0,31	0,18	0,46	1	-	-	-
Частка протяжності крони (%), P_{Lc}	0,24	0,29	0,1	0,42	0,98	1	-	-
Індекс листкової поверхні, LAI	0,23	0,36	0,01	0,25	0,06	0,07	1	-
Щільність лідарних точок у кроні, Cr_{DNS}	0,67	0,92	0,17	0,97	0,44	0,41	0,26	1

В результаті проведеного аналізу рівняння множинної регресії отримало вигляд:

$$DBH_{LiDAR} = -0,0324 + 0,0093 \times H_{tree} + 0,0053 \times S_{Cr}. \quad (4.10)$$

Для оцінки точності та адекватності моделі було підраховано:

- коефіцієнт детермінації ($R^2=0,82$);
- множинний коефіцієнт кореляції ($R=0,904$);
- нормований коефіцієнт кореляції ($R_{adj}^2 = 0,81$)

середньоквадратичне відхилення коефіцієнта регресії від його істинного значення ($RMSE=0,019$).

Загалом рис. 4.13 підтверджує наявність тісного кореляційного зв'язку між отриманими DBH_{LiDAR} з даних лідара та даних наземного сканування.

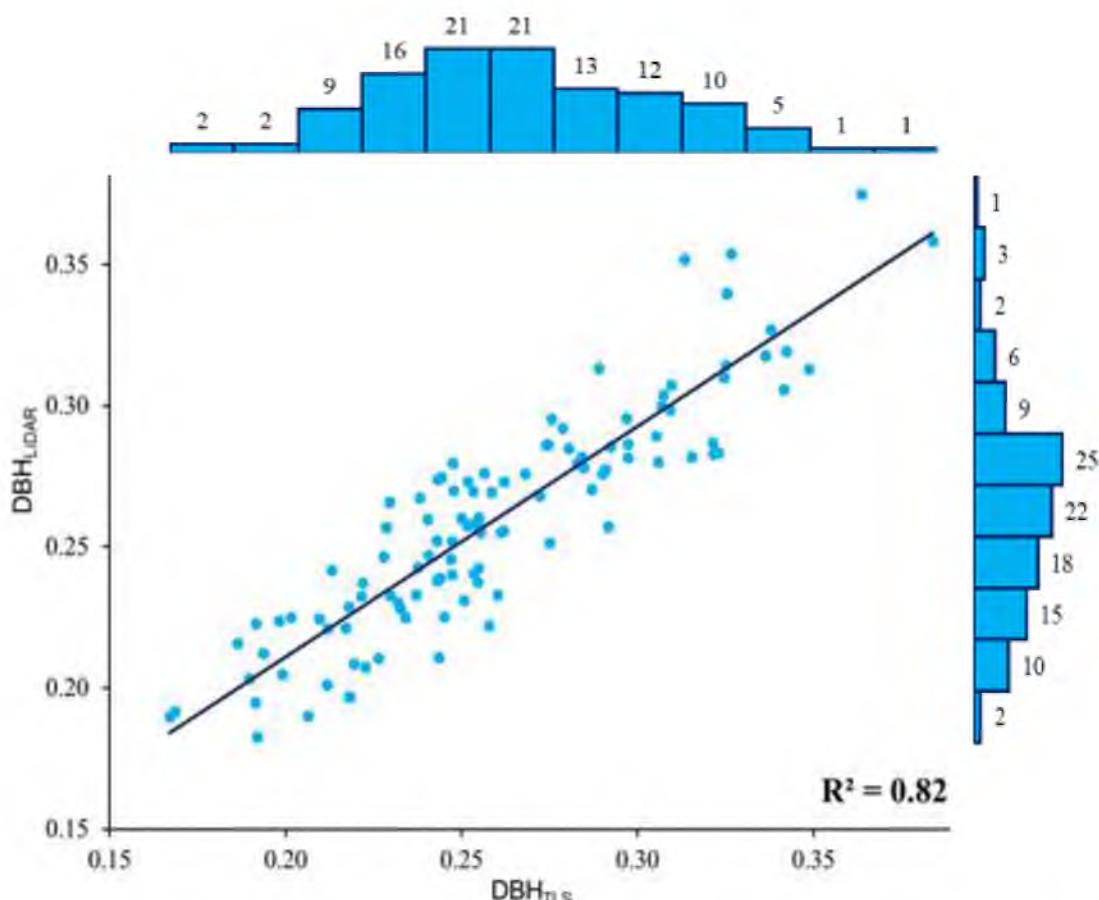


Рис. 4.13. Лінійна регресія зв'язку між результатами розрахунків DBH по наземним та дистанційним даним.

Графік розподілу залишків $\Delta DBH = DBH_{TLS} - DBH_{LiDAR}$, який зображене на рис. 4.14, свідчить, що максимальне відхилення ΔDBH не перевищує $\pm 4\text{cm}$. Це факт підтверджує високу точність та доцільність використання запропонованої множинної регресії.

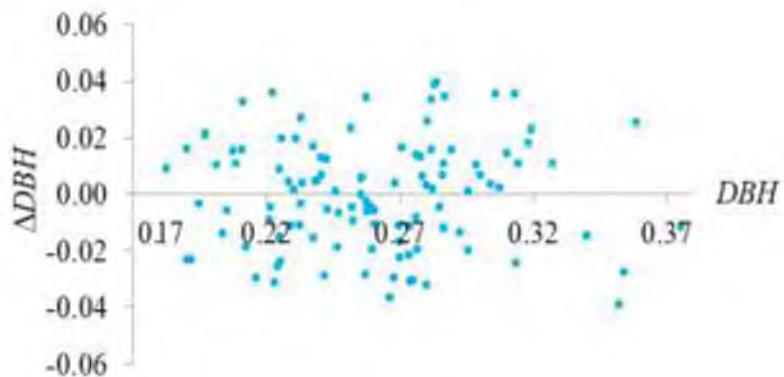


Рис. 4.14. Графік розподілу залишків

Наступним кроком був розрахунок діаметру стовбура на всю територію дослідження, використовуючи рівняння регресії (4.10), відповідно надалі $DBH = DBH_{LiDAR}$. Результат підрахунку DBH на територію дослідження зображене на рис. 4.15.

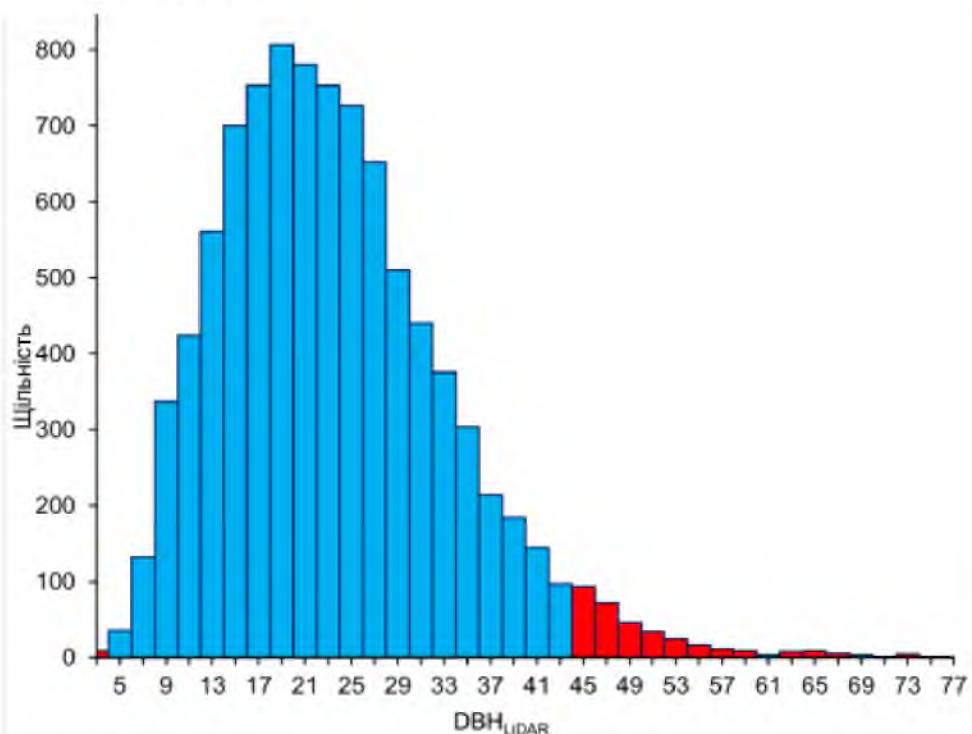


Рис. 4.15. Графік розподілу DBH на територію дослідження

Проаналізувавши результати розподілу DBH , було виявлено, що деякі DBH (на рис. 4.15 виділені червоним кольором): занадто малі, що неможливо, тому що дерева з висотою до 4 метрів, які могли мати такий діаметр, були виключені на початковому етапі виявлення локальних максимів та з даних воксельного аналізу; завеликі для стовбурів даного бонітету та віку. Загалом таких випадків було 258, що дорівнює 3% від загальної кількості дерев 9285 на території дослідження.

Для виправлення цієї помилки та пошуку інших можливих було вирішено використати критерій діапазонів за висотою дерева до його діаметру, оскільки висота з ЛД визначається найточніше та може слугувати надійним показником для валідації. В табл. 4.2 наведено можливий діапазон варіації діаметру стовбура до висоти відповідно до [29, 65].

Таблиця 4.2

Діапазон варіації діаметру стовбура дерева до його висоти

Висота дерева (м)	Мінімальний діаметр стовбура (см)	Максимальний діаметр стовбура (см)
4	4	6
6	4	12
8	4	16
10	6	20
12	8	24
14	8	30
16	10	32
18	12	36
20	14	40
22	16	44
24	18	44
26	20	44
28	26	44
30	32	44
32	40	44

Застосувавши даний діапазон до розрахованого DBH , було виявлено 1676 (18 %) дерев, які не входять в нього. Проаналізувавши ці дерева, було зроблено висновок, що більшість (52%) дерев, які не задовольняють критерієм, знаходились на границі території дослідження. Тобто там, де дані є неповними, які втратилась під час нарізки ЛД. Таким чином, ці дерева не бралися до уваги в подальшій валідації, тому що вони не дають адекватної оцінки методу.

Дерева, що залишились, - 805 (48%) - були поділені на дві категорії: DBH_{small} – діаметр менший від еталонних, що склало 299 дерев; DBH_{big} – діаметр більший від еталонних, 506 дерев відповідно. На рис. 4.18 а показано приклад класифікації дерев за помилками.

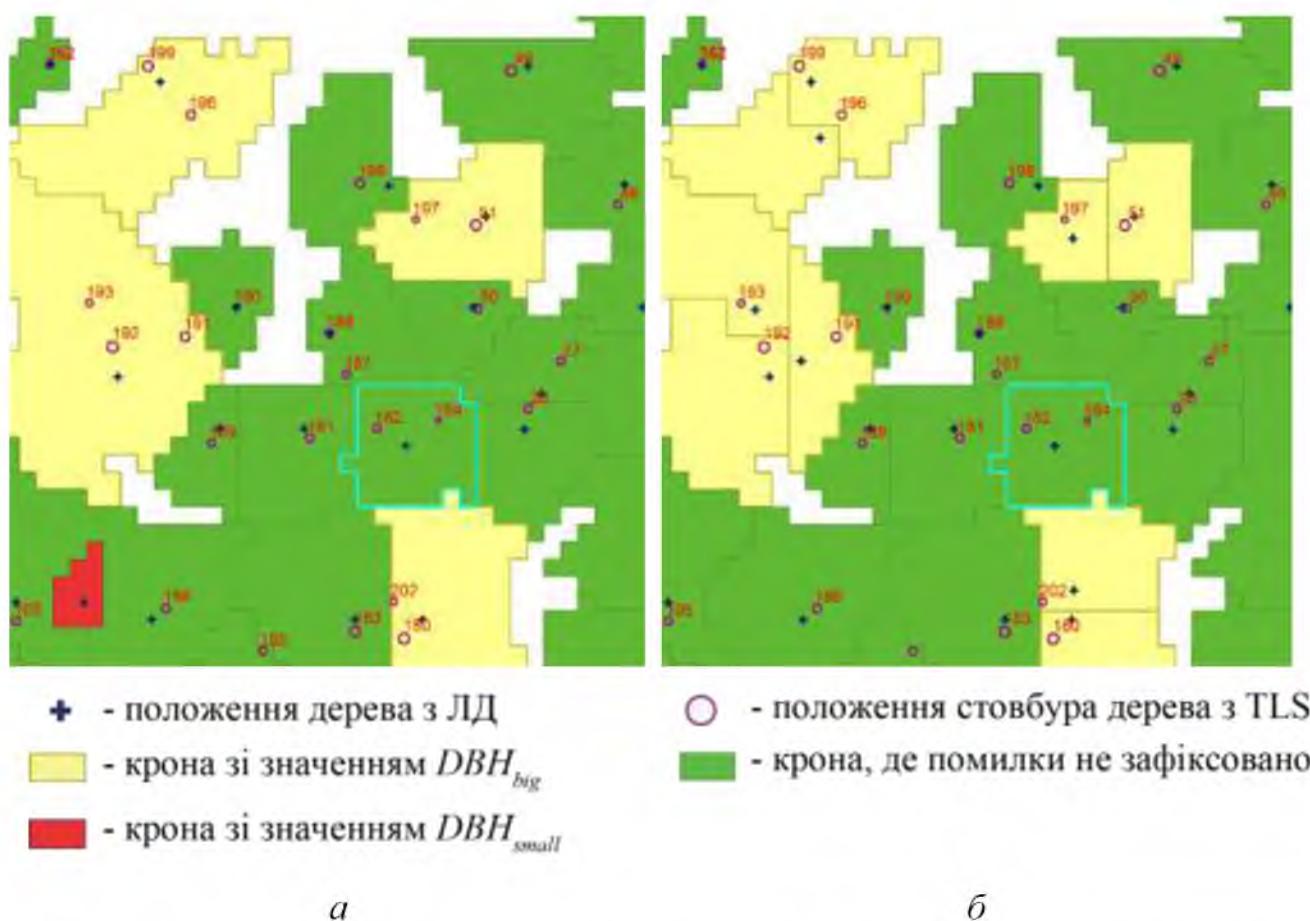


Рис. 4.16. Фрагмент території дослідження: *a* – приклад первого виділення дерев; *b* – результат повторного аналізу

Після проведеного аналізу помилок виявилося: в більшості випадках алгоритм пошуку не спрацював та дав помилку DBH_{big} у зв'язку з занадто близьким розміщенням дерев один від одного, що становило менше двох метрів між стовбурами; утворення DBH_{small} спричинили псевдо-локальні максимуми гілок, більшість таких помилок спостерігалась у дерев з виходом на відкриті території. Порівнявши результати еталонних дерев, отриманих з аналізу *TLS* та отриманих з АЛС, більшість помилок були правдивими, але були й моменти, коли дана перевірка не спрацювала, наприклад, дерева 182, 184, 187, 188 на рис 4.16.

Для покращення результату було вирішено провести кілька ітерацій аналізу для помилкових дерев. Зауважимо, що розрахунок DBH проводився з урахуванням площини поперечника, відповідно вони прямо пропорційно залежать від помилки, тобто чим менше DBH_{small} тим менший розмір поперечника крони та навпаки для DBH_{big} . Таким чином, дерева (локальні максимуми), що мають значення DBH_{small} були видалені, а їх крони були приєднані до сусідніх крон. Крім випадків коли DBH_{small} має сусіда DBH_{big} , в такому разі вся територія крони обов'язково приєднується до дерева із значенням DBH_{big} .

Наступним кроком стало накладання векторної маски крон на ЛД та виокремлення точок, що належать до помилкових. Для виділених точок алгоритми виявлення локальних максимумів та воксельний аналіз повторюється із зменшенням порогу фільтрації, розміра піксела та особливо із поступовим зменшенням порогу критерію пошуку найближчої відстані до 1,75; 1,5; 1,25 та 1,0 м. Після проведення цього аналізу дані об'єднуються та алгоритм пошуку помилок DBH_{small} та DBH_{big} повторюється. Цикл зупиняється, коли результат повторюється або не зазнає значних змін. Загалом було проведено три ітерації, тому що при значному зменшенні порогу

критерію пошуку найближчої відстані збільшувалась кількість помилки DBH_{small} , відповідно цикл прямує до нескінченості.

Після проведення всіх вищеописаних кроків було проведено оцінку точності отриманих результатів та структуровано їх у табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Результат застосування розробленого методу

Параметр	Значення
Площа (га)	21,9
Загальна кількість дерев, виявлених з ЛД	9470
Кількість дерев, виявлених з ЛД на території валідації	452
Кількість дерев TLS	538
Помилки	
Невиявлених дерев з ЛД	86
Відношення виявлених з ЛД до TLS (%)	84
DBH_{small}	8
DBH_{big}	37
FAE	6
RMSE_TLE (м)	0,96
RMSE_HM (м)	1,14
Середні показники деревостану визначені з ЛД	
Висота (м)	22,4
DBH (см)	23,9
Об'єм крони ($м^3$)	21,64
Площа поперечника крони ($м^2$)	12,47
Протяжність крони (м)	8,75
Відношення протяжності крони до висоти (%)	37,46

4.4. Результати розрахунку надземної фітомаси

Маючи на територію дослідження кількість дерев, значення висоти та діаметр стовбура кожного дерева, можна підрахувати повноту деревостану за формулами (1.2-1.4).

В табл. 4.4 показано дані розрахунку повноти деревостану 52-річної сосни звичайної, перший клас бонітету на територію дослідження.

Таблиця 4.4

Результат розрахунку відносної повноти соснових деревостанів на територію дослідження

Характеристика \ Показник	Таксаційні		Еталонний	Відносний
	Загальний	Середній		
Площа (га)	21,9	1	1	-
Кількість дерев	9470	432	1052	0,4
Середня висота (м)	22,4	22,4	22,2	1,0
Середній діаметр (см)	23,9	23,9	23,3	1,0
Сума площ перетинів дерев (m^2)	484,1	22,1	45,9	0,5

Результати, наведені у табл. 4.4, свідчать, що середня висота та діаметр для 52-ох річної сосни звичайної першого бонітету збігається з еталонними та, в свою чергу, означає, що визначений бонітет і вік на територію вірний.

Зауважимо, що відносна густота деревостану та сума площ перетинів дерев, наближені один до одної, що дає впевненість у вірності підрахунків. Таким чином, відносна повнота в даному випадку становить $P=0,5$, тобто середньоповнотний деревостан.

Розрахунок фітомаси було здійснено за алометричними рівняннями (1.5-1.24). Зауважимо, що всі розрахунки проводились в програмному

середовищі Scilab (додаток В). В табл. 4.5 представлено результати розрахунку компонентів надземної фітомаси на територію дослідження.

Таблиця 4.5

Результат розрахунку компонентів фітомаси на територію дослідження

Показник Компонент фітомаси	Загальний (m)	Середній (m/га)
Стовбура m_{∂}^{cm}	2170,37	108,55
Кори стовбура m_k^{cm}	121,52	6,12
Стовбура в корі m^{cm}	2291,89	114,67
Хвої m_{xv}	149,63	8,93
Гілок m_{el}	192,84	7,35
Крони m_{kp}	342,47	16,28
Дерева m_{der}	2634,35	130,95

На рис. 4.17 зображене загальний розподіл надземної фітомаси на територію дослідження.

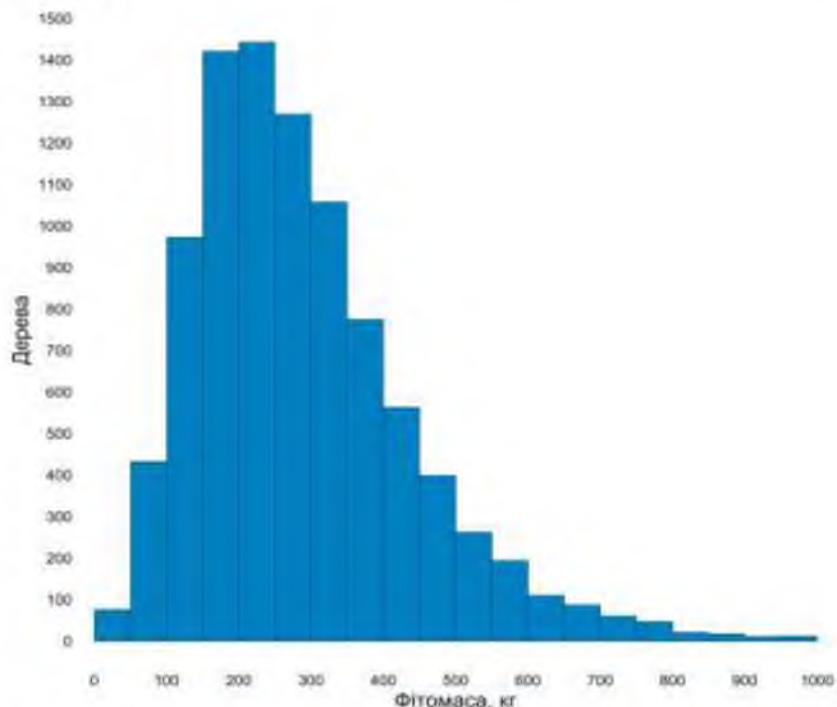


Рис. 4.17. Розподіл надземної фітомаси на території дослідження

4.5. Інтегральна оцінка точності розробленого методу визначення надземної фітомаси за даними авіаційної лідарної зйомки

Метою валідації запропонованого методу є визначення точності та доцільності його застосування. Останнім етапом валідації розробленого методу оцінювання надземної фітомаси за даними авіаційної лідарної зйомки стало статистичне оцінювання повного циклу обчислення деревної фітомаси. Оцінку проведено шляхом статистичного моделювання за методом Монте-Карло [93].

В рамках цього методу вілідація здійснюється багаторазовою оцінкою фітомаси тестової ділянки з врахуванням випадкової варіації значень змінних згідно з визначеними раніше статистичними розподілами. Оскільки розмір статистичних вибірок був досить значним, застосовувався гаусівський розподіл імовірностей. При моделюванні було зроблено декілька тисяч прогонів оцінювання.

Для реалізації оцінки точності на території дослідження було вибрано тестову завіркову ділянку площею приблизно 0,28 га на якій наземним методом було підраховано кількість дерев та їх параметри (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Вхідні значення для реалізації оцінки точності

Показник	Значення
Кількість еталонних дерев з TLS	180
Кількість виявлених дерев + (FAE) з АЛЗ	152+(2)
Параметри еталонних дерев:	
- середнє значення висоти (<i>m</i>)	23,03
- середнє квадратичне відхилення висоти (<i>m</i> ²)	1,7
- середнє значення поперечника крони (<i>m</i> ²)	15,32
- середнє квадратичне відхилення поперечника крони (<i>m</i>)	8,2
- середнє значення поперечника діаметру стовбура (<i>m</i>)	0,25
- середнє квадратичне відхилення діаметру стовбура (<i>m</i>)	0,05

За допомогою моделювального скрипта в обчислювальному середовищі SciLab виконувалося по 1000 ітерацій оцінювання похибки визначення фітомаси при кожному запуску. Програмний код скрипта міститься в додатку Г.

У табл. 4.7 відображені досягнуті результати моделювання оцінки точності за методом Монте-Карло.

Таблиця 4.7

Результати оцінювання точності методом Монте-Карло

Показник	Значення
Кількість надземної фітомаси на основі польових вимірювань (кг)	46630,569
Кількість надземної фітомаси на основі лідарної зйомки (кг)	42410,861
Середнє відхилення значень надземної фітомаси (%)	-9,061
Максимальне відхилення значень надземної фітомаси (%)	-11,665

Отримані результати показують, що точність результатів визначення кількості надземної фітомаси за допомогою запропонованого методу на тестовій ділянки складає приблизно 88% – у найгіршому випадку.

Отже, отримані результати та проведена оцінка їх точності підтверджують достатньо високу ефективність розробленого методу визначення надземної фітомаси за даними авіаційної лідарної зйомки в разі дотримання сформульованих вимог і обмежень. Головною перевагою методу є коректна адаптація дистанційних технологій до визначення надземної фітомаси.

Варто підкреслити, що точність підрахунку надземної фітомаси залежить не тільки від точності запропонованого в даній роботі методу, а також від точності проведення лісотаксаційних робіт та нормативних таблиць розрахунку фітомаси.

Висновки до розділу

1. Запропоновано використовувати воксельний аналіз для покращення результатів виділення дерев. Розроблено програмний код для переведення лідарних точок в структуровану координатну сітку значень, для подальшого інтегрування у воксельний вигляд або у векторні просторові об'єкти. Обґрунтовано доцільність комплексування результатів виявлення дерев методом пошуку локальних максимів у 2,5D та воксельного аналізу у 3D. Запропоновано метод розрахунку об'єму та протяжності крони на основі побудови вокселів з лідарних даних.

2. Запропоновано метод дистанційного оцінювання LAI, в основі якої – регресійна модель зв'язку між значеннями LAI, отриманими методом обрахунку прогалин з напівсферичної фотографії та параметрами деревостану, отриманими з опрацювання даних авіаційної лідарної зйомки. Наведено результати випробування запропонованої методики, які підтверджують її працездатність та перспективність для оцінювання LAI рослинності на великих площах. Отримано карти розподілу LAI на територію дослідження.

3. Комплексування лідарних даних і польових вимірювань на обраній ділянці дослідження дозволило розрахувати значення діаметру стовбура на висоті грудей, що, в свою чергу, дало можливість оцінити суму площ перетинів дерев, які потрібні для визначення повноти деревостану. Запропоновано та наведено рівняння множинної регресії для розрахунку діаметру стовбура на висоті грудей.

4. Показано, що виокремлення дерев на основі лідарних даних створює можливість обчислювати морфологічні параметри дерев і, таким чином, оцінювати надземну фітомасу деревостану на прикладі сосни звичайної. Наведено результати розрахунку надземної фітомаси за її компонентами на територію дослідження.

5. Шляхом статистичного моделювання за методом Монте-Карло було проведено інтегральну оцінку точності розробленого методу визначення надземної фітомаси за даними авіаційної лідарної зйомки. Результати, отримані на даних тестової ділянки, показують, що точність результатів визначення кількості надземної фітомаси за допомогою запропонованого методу складає 88-91%.

ВИСНОВКИ

Вперше розроблено метод визначення надземної фітомаси деревостану сосни звичайної на основі матеріалів авіаційної лідарної зйомки, який, на відміну від раніше відомих, передбачає більш повне задіяння інформації про тривимірну структуру природних об'єктів, яка отримується шляхом опрацювання матеріалів авіаційної лідарної зйомки. Крім того, метод адаптований до таксаційних характеристик деревостану, які використовуються при інвентаризації лісів України. Разом це забезпечує підвищення оперативності і точності визначення фітомаси деревостанів сосни звичайної.

1. В роботі проведено порівняльний аналіз сучасних методів визначення фітомаси деревостанів і показано, що одним з перспективних шляхів вирішення цієї задачі є застосування дистанційних методів. Проаналізовано переваги і недоліки засобів ДЗЗ, які можуть використовуватися при вирішенні даної задачі. Зроблено і обґрунтовано вибір на користь активних засобів дистанційного отримання інформації про лісові насадження, а саме авіаційного лідара.

2. Розглянуто методичні основи прикладного опрацювання лідарних даних, зокрема, особливості представлення геопросторових об'єктів при обробленні лідарних даних та основні підходи та алгоритми для оброблення даних лідарної зйомки.

3. Наведено та обґрунтовано схему методу дистанційного визначення фітомаси за даними авіаційної лідарної зйомки.

4. Проведено оцінку точності існуючих методів автоматизованого виділення дерев. Показано, що найкращий результат при виділенні дерев у сосновому деревостані забезпечують методи, засновані на аналізі об'єктів у 2,5-вимірному просторі, але точніші за просторовими показниками

виявилися методи, засновані на аналізі об'єктів у тривимірному просторі. Експериментально виявлено, що за допомогою методу пошуку локальних максимумів у 2,5D може бути виділено до 74% дерев. Показано, що при застосуванні 2.5D-підходів є можливість застосування сегментації вододілу для окреслення крон зі складною геометрією, яка має місце на практиці.

5. Запропоновано використовувати вокセルний аналіз для покращення результатів виділення дерев. Обґрутовано доцільність комплексування результатів виявленіх дерев методом пошуку локальних максимумів у 2,5-вимірному просторі та вокセルного аналізу у тривимірному просторі.

6. Розроблено метод розрахунку об'єму та протяжності крони на основі побудови вокselів з лідарних даних.

7. Запропоновано метод дистанційного оцінювання індексу листкової поверхні, в основі якого – регресійна модель зв'язку ($R^2=0,64$) між значеннями LAI, отриманими методом обрахунку прогалин пологу лісу з напівсферичної фотографії, та параметрами деревостану, отриманими з опрацювання даних авіаційної лідарної зйомки. Наведено результати випробування запропонованої методики, які підтверджують її працевздатність та перспективність для оцінювання LAI рослинності на великих площах.

8. Комплексування лідарних даних і польових вимірювань на обраній ділянці досліджень дозволило розрахувати значення діаметру стовбура на висоті грудей, що, в свою чергу, дало можливість оцінити суму площ перетинів дерев, які потрібні для визначення повноти деревостану. Запропоновано та наведено рівняння множинної регресії для розрахунку діаметру стовбура на висоті грудей. Для оцінки точності та адекватності регресійної моделі було підраховано: коефіцієнт детермінації ($R^2=0,82$); середньоквадратичне відхилення коефіцієнта регресії від його істинного значення ($RMSE=0,019$).

9. Запропоновано використовувати обмеження варіації діаметра стовбура до висоти дерева, що зменшило кількість помилок та покращило точність виділення дерев аж до 84%.

10. Наведено результати розрахунку надземної фітомаси за її компонентами на територію дослідження, що становить 130 т/га. Шляхом статистичного моделювання за методом Монте-Карло проведено інтегральну оцінку точності розробленого методу визначення надземної фітомаси за даними авіаційної лідарної зйомки. Результати, отримані на даних тестової ділянки, показують, що точність визначення надземної фітомаси за допомогою розробленого методу складає 88-91%.

Розроблений метод може бути використаний як самостійно, так і як доповнення при таксаційному оцінюванні фітомаси дерев та деревостанів. Метод містить в собі кілька проміжних етапів розрахунку кількісних характеристик деревостану. Перевага такої структури методу в тому, що окремі етапи практично незалежні один від одного та можуть застосовуватись як самостійні інструменти підтримки управлінських рішень в лісогосподарських, лісовпорядкувальних, ресурсознавчих і екологічних задачах у системі Державного комітету лісового господарства та в інших установах України.

Автор вбачає перспективу подальших досліджень, в першу чергу, в адаптуванні розробленого методу для випадків інших порід дерев та в максимальній автоматизації етапів розрахунку кількісних характеристик деревостану.

ЛІТЕРАТУРА

1. Попов М. О. Оцінювання характеристик зелених насаджень з використанням засобів дистанційного зондування Землі / М. О. Попов, І. Д. Семко // Екологічна безпека та природокористування : зб. наук. пр. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. [та ін.]. – К., 2013. – Вип. 12. – С. 51–62.
2. Попов М. Оцінювання індексу листкової поверхні за даними авіаційної лідарної зйомки / М. Попов, І. Семко, І. Козак // Екологічна безпека та природокористування : зб. наук. пр. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. [та ін.]. – К., 2014. – Вип. 14. – С. 126–139.
3. Семко І. Д. Порівняльний аналіз методів автоматизованого виділення окремих дерев у лісовому масиві за даними лазерно-локаційного знімання / І. Д. Семко // Вісник геодезії та картографії. – К., 2014. – №. 4. – С. 31–37.
4. Popov M. Metoda oceny wskaźnika powierzchni liści z zastosowaniem lotniczego skaningu lidarowego / M. Popov, I. Semko, I. Kozak // Acta Agrophysica. – Lublin., 2014. – Vol. 21. – №. 2. – P. 205–217.
5. Popov M. Estimation of forest above-ground biomass rate using airborne LiDAR data / M. Popov, I. Semko, I. Kozak // The Problems of Landscape Ecology, W., 2014. – Tom 38. – Vol. 38. – P. 27–35.
6. Kociuba P. Perspektywy zastosowania danych ALS do analizy wąwozów w Lublinie / P. Kociuba, I. Kozak, I. Semko, H. Kozak // Wąwozy i suche doliny – potencjał i zagrożenia. Wydano przez Urząd Miasta Lublin. – Lublin, 2014. – P. 260–269.
7. Семко І. Д. Інвентаризація та створення цифрових карт зелених насаджень в умовах міських агломерацій / І. Д Семко // Екологічна безпека держави : тези доп. Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів, (НАУ, Київ, 16-18 квітня 2013). – К. : НАУ, 2013. – С. 160.
8. Семко І. Д. Методи автоматизованого виділення окремих дерев у лісовому масиві за даними лазерно-локацийного знімання / І. Д Семко //

Астрономічна школа молодих вчених : тези доповідей міжнародної наукової конференції, (КДПУ, Кіровоград, 29–31 травня 2014). – К. : НАУ, 2014. – С. 56–57.

9. Попов М. Використання засобів дистанційного зондування землі для потреб лісового господарства / М. Попов, І. Козак, А. Козлова, І. Семко, П. Коцюба // Інтеграція геопросторових даних у дослідженнях природних ресурсів : матеріали міжнародної науково-практичної конференції (НУБІП, ЦАКІДЗ, ТВІС. Київ, 27-28 листопада 2014) – К. : НУБІП, 2014. – С. 36–39.

10. Popov M. Estimation of leaf area index using airborne lidar data / M. Popov, I. Semko, I. Kozak; Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки : матеріали доповідей четвертої всеукраїнської конференції “GEO-UA”, (НКД НАНУ-ДКАУ, Київ, 26-30 травня 2014). – К. : Наук. думка, 2014. – С. 75–76.

11. Popov M. Estimating of forest biomass using airborne LiDAR data / M. Popov, I. Semko, I. Kozak // Krajobraz z komputera : abstracty referatow i posterow ogólnopolska konferencja naukowa. Białystok, 2014 : pod redakcją E. Regulskiej i J. Solona (Польща, Білосток, 17-20 вересня 2014). – Warsaw, 2014. – P. 38–39.

12. Kozak I. Analiza dynamiki wsi w krajobrazie sanocko-turczańskim / I. Kozak, H. Kozak, P. Kozak, I. Semko // Walory przyrodnicze i turystyczne północnej części euroregionu karpackiego : abstracty referatow międzynarodowej konferencji ekologicznej, (Польща, Бжозув, 23-24 вересня 2014). – Brzozów, 2014. – P. 16–17.

13. Kociuba P. Perspektywy zastosowania modelu automatów komórkowych w badaniu krajobrazu doliny rzeki san w bieszczadach / P. Kociuba, I. Kozak, I. Semko // Walory przyrodnicze i turystyczne północnej części euroregionu karpackiego : abstracty referatow międzynarodowej konferencji ekologicznej, (Польща, Бжозув, 23-24 вересня 2014). – Brzozów, 2014. – P. 29–30.

14. Kociuba P. Perspektywy zastosowania danych ALS do analizy wawozów w Lublinie / P. Kociuba, I. Kozak, I. Semko, H. Kozak // Wąwozy i

suche doliny Lublina – potencjał i zagrożenia : abstracty referatow konferencji, (Польща, Люблін, 12 грудня 2014). – Lublin, 2014. – Р. 53–54.

15. Попов М. Метод визначення фітомаси деревостану сосни звичайної на основі матеріалів авіаційної лідарної зйомки / М. Попов, І. Козак, І. Семко, П. Коцюба // Астрономічна школа молодих вчених : тези доповідей міжнародної наукової конференції, (ЖДУ ім. І. Франка, Житомир, 20–22 травня 2015). – К. : НАУ, 2015. – С. 66–67.

16. Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля : постанова Кабінету Міністрів України від 30 берез. 1998 р. № 391 [Електронний ресурс] // Офіційний вісник України. – 1998. - № 13. – С. 91. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua>.

17. Про затвердження Державної цільової програми "Ліси України" на 2010-2015 роки : постанова Кабінету Міністрів від 16 верес. 2009 р. № 977 [Електронний ресурс] // Офіційний вісник України. – 2009. – № 72. – С. 5. – Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua>.

18. Національна інвентаризація лісів України: концептуальні засади та вибірковий дизайн [Електронний ресурс] : (проект) / Українське державне проектне лісовпоряднє виробниче об'єднання. – Ірпінь, 2008. – 45 с. – Режим доступу : <http://www.lesovod.org.ua>.

19. Лісовий кодекс України : прийнятий Верховною Радою України 21.01.1994 р. № 3852-XII : текст зі змінами станом на 01.01.2015 р. [Електронний ресурс]. // Відомості Верховної Ради України. – 1994. – № 17. – С. 443. – Режим доступу : <http://www.zakon1.rada.gov.ua>.

20. Інструкція з впорядкування лісового фонду України. Частина перша. Польові роботи [Електронний ресурс] : Державне агентство лісових ресурсів України. Українське державне проектне лісовпоряднє виробниче об'єднання ВО "Урдергліспроект". – Ірпінь, 2006. – 75 с. – Режим доступу: <http://www.lisproekt.gov.ua>.

21. Цурик Є. І. Таксаційні ознаки й будова насаджень : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / Є. І. Цурик ; Укр. держ. лісотехн. ун-т. – Львів : Сплайн, 2001. – 361 с.
22. Третьяков Н. В. Закон единства в строении насаждений / Н. В. Третьяков. – М. : Новая деревня, 1927. – 113 с.
23. Третьяков Н. В. Справочник таксатора / Н. В. Третьяков, П. В. Гор'кий, Г. Г. Самойлович – М. : Гослесбумиздат, 1952. – 854 с.
24. Третьяков Н. В. Справочник таксатора / Н. В. Третьяков, П. В. Гор'кий, Г. Г. Самойлович. – 2-е изд. – М. : Лесная промышленность, 1965. – 460 с.
25. Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии / Н. И. Базилевич. – М. : Наука, 1993. – 293 с.
26. М'якушко В. К. Первична біологічна продуктивність соснових лісів Українського полісся / В. К. М'якушко // Український ботанічний журнал, 1972. – Т. 29. – № 3. – С. 328–339.
27. Уткин А. И. Исследование первичной биологической продуктивности лесов СССР / А. И. Уткин // Лесоведение. – 1975. – Т. 1. – С. 179–189.
28. Лакида П. І. Фітомаса лісів України : моногр. / П. І. Лакида. – Тернопіль : Збруч, 2002. – 256 с.
29. Лакида П. І. Нормативи оцінки компонентів надземної фітомаси дерев головних лісотвірних порід України / П. І. Лакида. та інші. – К. : Видавничий дім «ЕКО-інформ», 2011. – 192 с.
30. Документ ФАО по лесному хозяйству. Глобальная оценка лесных ресурсов 2010 года [Електронний ресурс] : основной отчет / Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН. – Рим, 2011. – 371 с. – Режим доступу: <http://www.fao.org>.
31. The MCPFE report on sustainable forest management in Europe. State of Europe's forests [Електронний ресурс] : MCPFE Liaison Unit. – Warsaw, 2007. – 247 pp. – Режим доступу: <http://www.foresteurope.org>.

32. A programme aiming at a comprehensive compilation of information on the condition of forests in Europe and beyond [Електронний ресурс] : / Created by XQX AG. – Електронні дані. – International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests, [2011. –]. – Режим доступу: <http://icp-forests.net>.
33. Pitman R. M. Forest Monitoring: Methods for terrestrial investigations in Europe with an overview of North America and Asia / R. M. Pitman // Developments in Environmental Science, 2013. – Vol. 12. – P. 251–264.
34. John R. Fletched, Global Climate Change: The Kyoto Protocol, International Environmental Policy, Resources, Science and Industry Division, / R. John, R. Susan // CRS Report for Congress, 2002. – 17 pp.
35. Picard N. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction / N. Picard, L. Saint-André, M. Henry. – Rome, 2012. – 215 pp.
36. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялька та М. О. Попова. – К. : Наук. думка, 2006. – 360 с.
37. Данилин И. М. Определения надземной фитомассы древостоев по аэроснимкам / И. М. Данилин // Лесное хозяйство. – 1993. – № 1. – С. 35–36.
38. Яценко В. А. Новый метод дистанционного оценивания содержания хлорофилла в растительности и его программно-аппаратная реализация / В. А. Яценко, С. М. Кочубей, П. А. Хандрига, В. В. Донец, О. В. Семенив // Косм. наука і технологія, 2007. – Т. 13, – № 3. – С. 35-44.
39. Myneni R. B. The Interpretation of Spectral Vegetation Indexes / R. B. Myneni, F. G. Hall, P. J. Sellers, A. L. Marshak // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995. – Vol. 33, – No. 2. – P. 481–486.
40. Dong J. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks / J. Dong, R. Kaufmann, R. Myneni, C. Tucker, P. Kauppi, J. Liski, W. Buermann, V. Alexeyev, M. Hughes // Remote Sensing of Environment, 2003. – Vol. 84. – P. 393–410.

41. Zheng D. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA / D. Zheng, J. Rademacher, J. Chen, T. Crow, M. Bresee, J. Le Moine, S. Ryu // Remote Sensing of Environment, 2015. – Vol. 93. – No 3. – P. 402–411.
42. Mauro G. High resolution satellite imagery for forestry studies: the beechwood of the pordenone mountains [Електронний ресурс]. – Italy, 2003 – Режим доступу: <http://www.isprs.org>.
43. Liu J. Monitoring crop biomass accumulation using multi-temporal hyperspectral remote sensing data / J. Liu, J. Miller, E. Pattey, D. Haboudane, I. Strachan, M. Hinther // International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. – Vol. 3. – P. 1637–1640.
44. Медведев Е. М. Лазерная локация земли и леса. 2 изд. / Е. М. Медведев, И. М. Данилин, С. Р. Мельников. – Красноярск : Геокосмос; Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 229 с.
45. Measures R. Laser Remote Sensing : Fundamentals and Applications / R. Measures. – Malabar, Florida : Krieger Publ. Company, 1992. – 510 pp.
46. Nelson R. How did we get here? An early history of forestry lidar / R. Nelson // Canadian Journal of Remote Sensing, 2013. – No 39. – P. 6–17.
47. ASPRS Standards, Guidelines, and Best Practices [Електронний ресурс] : LASer (LAS) File Format Exchange Activities / The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, [2003. –]. – Режим доступу: <http://www.asprs.org>.
48. Aldred A. Application of airborne lasers to forest surveys. Canadian Forestry Service / A. Aldred, M. Bonner // Petawawa National Forestry Centre, Information Report, 1985. – P. 51–62.
49. Maclean G.A. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne LIDAR system / G.A. Maclean, W.B. Krabill // Canadian Journal of Remote Sensing, 1986. – Vol. 12, – No 1. – P. 7–18.

50. Nelson R. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data / R. Nelson, W. Krabill, J. Tonelli // *Remote Sensing of Environment*, 1988. – Vol. 24. – P. 247–267.
51. Lefsky M. A. Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes / M. A. Lefsky, W. B. Cohen, D. J. Harding, G. G. Parker, S. A. Acker, S. T. Gower // *Global Ecology & Biogeography*, 2002. – Vol. – 11. – P. 393–399.
52. Popescu S. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar / S. Popescu // *Biomass and Bioenergy*, 2007. – Vol. 31. – P. 646–655.
53. Morsdorf F. Clustering in Airborne Laser Scanning Raw Data for Segmentation of Single Trees / F. Morsdorf, E. Meier, B. Allgöwer, D. Nüesch // *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2003. – Vol. 34, – No. 3. – P. 330–336.
54. Wang Y. Lidar point cloud based fully automatic 3D single tree modelling in forest and evaluations of the procedure / Y. Wang, H. Weinacker, B. Koch, S. Krzysztof // *International Archives of the Photogrammetry*, 2008. – Vol. 37. – P. 45–52.
55. Ene L. Single tree detection in heterogeneous boreal forests using airborne laser scanning and area based stem number estimates / L. Ene, E. Næsset, T. Gobakken // *International Journal of Remote Sensing*, 2010. – Vol. 33, – No. 16. – P. 5171–5193.
56. Pitkänen J. Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model / J. Pitkänen, M. Maltamo, J. Hyppä, X. Wei Yu // *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2004. – Vol. 36. – P. 187–191.
57. Brandtberg T. Automatic individual tree-based analysis of high spatial resolution remotely sensed data : Doctoral thesis : T. Brandtberg ; Swedish University of Agricultural Sciences, Centre for Image Analysis, Uppsala. – Sweden, 1999. – 155 pp.

58. Gupta S. Comparative Analysis of Clustering-Based Approaches for 3-D Single Tree Detection Using Airborne Fullwave Lidar Data / S. Gupta, H. Weinacker, B. Koch // Remote Sensing, 2010. – №2. – P. 968–989.
59. Solberg S. Single tree segmentation using airborne laser scanner data in a structurally heterogeneous spruce forest / S. Solberg, E. Næsset, O. Bollandsas // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006. – Vol. 72. – P. 1369–1378.
60. Xiao W. Detecting changes in trees using multi-temporal airborne lidar point clouds : Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation : Wen Xiao ; The University of Twente The Netherlands, 2012. – 40 pp.
61. Hyppä J. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner / J. Hyppä, M. Inkinen // The Photogrammetric Journal of Finland, 1999. – Vol. 16, – No. 2. – P. 27–42.
62. Heinzel J. Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification International Journal of Applied Earth / J. Heinzel, B. Koch // Observation and Geoinformation, 2011. – Vol. 13. – P. 152–160.
63. Persson A. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner / A. Persson, J. Holmgren, U. Soderman // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2002. – Vol. 68, – No. 9. – P. 925–932.
64. Rossmann J. Using airborne laser scanner data in forestry management: A novel approach to single tree delineation / J. Rossmann, M. Bücken, P. Krahwinkel // SilviLaser, 2007. – Vol. 36, – No. 3. P. 350–354.
65. Швиденко А. З. Нормативно-справочные материалы для таксации лесов Украины и Молдавии / А.З. Швиденко. – К. : Урожай, 1987. – 560 с.
66. Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев / В. А. Усольцев– Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1985. – 192 с.

67. Усольцев В. А. О точности регрессионной оценки фитомассы древостоев / В. А. Усольцев // Вестник с.-х. науки Казахстана, 1984. – № 9. – С. 77–83.
68. Світличний О. О. Основи геоінформатики : Навчальний посібник / О. О. Світличний, С. В. Плотницький. – Суми : ВТД «Університетська книга», 2006. – 295 с.
69. Sharma M. DEM Development from Ground-Based LiDAR Data: A Method to Remove Non-Surface Objects / M. Sharma, G. Paige, S. Miller // Remote Sensing, 2010. – Vol. 2. – P. 2629–2642.
70. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с.
71. The ArcGIS Help Library : [Електронний ресурс] / Resource Center. Esri, [1995. –]. – Режим доступу: <http://resources.arcgis.com>.
72. Lidar Analysis in ArcGIS 10 for Forestry Applications / An Esri® White Paper. Esri, 2011 – New York. – 49 pp.
73. Lim Ch. Estimation of Urban Tree Crown Volume based on Object-oriented approach and LIDAR Data: degree of Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation : Changok Lim ; The International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 2007. – Netherlands. – 83 pp.
74. Pack R. Lidar bare-earth modeling of overhanging cliffs – extending 2.5D lidar classifiers to handle 3D surface classification problems / R. Pack, K. Blonquist, B. Carter : Annual Conference Sacramento. – ASPRS, 2012. – California. – 10 pp.
75. Aguayo P. Solar Energy Potential Analysis at Building Scale Using LiDAR and Satellite Data : the thesis of Master of Science in Geography: Paula Aguayo ; Ontario. The University of Waterloo. – Canada, 2013. – 148 pp.
76. Vauhkonen J. Estimating single-tree attributes by airborne laser scanning: methods based on computational geometry of the 3-D point data : Thesis

for the PhD : Jari Vauhkonen ; School of Forest Sciences Faculty of Science and Forestry University of Eastern Finland. – Finland, 2010. – 44 pp.

77. Theodoridis S. Pattern recognition, 4th edition. / S. Theodoridis, K. Koutroumbas. – Academic Press, 2009. – 216 pp.

78. Baatz M. Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation / M. Baatz, A. Schape // Angewandte Geographische Information sverarbeitun, 2000. – XII. – P. 12–23.

79. Blaschke T. Object-oriented image processing in an integrated GIS.rcmotc scasing environment and perspectives for environmental applications / T. Blaschke, S. Lang, E. Lorup, J. Strobl, P. Zeil // Environmental Information for Planning, Politics and the Public, 2000. – Vol. 2. – P. 555–570.

80. Keyport R. N. A comparison of pixel-based versus object oriented analysis of landslides using historical remote sensing data : A report Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science In Geology / Ren N. Keyport ; Michigan Technological University. – USA, 2013. – 42 pp.

81. Blaschke T. What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS / Blaschke T., Strobl J. // GIS-Zeitschrift fir Geoinformationssysteme, 2001. – Vol. 14, No 6. – P. 12–17.

82. Aardt J. An Object-Oriented Approach to Forest Volume and Aboveground Biomass Modeling using Small-Footprint Lidar Data for Segmentation, Estimation, and Classification / PhD dissertation in Forestry: Jan A.N. van Aardt ; Virginia Polytechnic Institute and State University. – Blacksburg, 2004. – 344 pp.

83. Blaschke T. Object based image analysis for remote sensing / T. Blaschke // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010. – Vol. 65, – No 1. P. 2–16.

84. Laliberte A. Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico / A. Laliberte,

- A. Rango, K. Havstad, J. Paris, R. Beck, R. McNeely, A. Gonzalez // *Remote Sensing of Environment*, 2004. – Vol. 93. – P. 198–210.
85. MacQueen J. B. Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations / J. B. MacQueen : Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. – USA : University of California Press, 1967. – P. 281–297.
86. Garcia-Gutierrez J. Remote mining: from clustering to DTM / J. Garcia-Gutierrez, F. Martinez-Alvarez, D. Laguna-Ruiz and J.C. Riquelme // *SilviLaser*, 2008. – P. 389–397.
87. Bhagwat M. Simplified Watershed Transformation / M. Bhagwat // *International Journal of Computer Science & Communication*, 2010. – Vol. 1, – No. 1. – P. 175–177.
88. Haralick R. Image analysis using mathematical morphology / R. Haralick, R. Stanley, Z. Xinhua // *Transact. Pattern Anal. Machine Intelligence*, 1987. – № 9 (4). – P. 532–550.
89. Kothe U. Primary Image Segmentation / U. Kothe, G. Sagerer, S. Posch, F. Kummert // *Mustererkennung DAGM-Symposium*, 1995. – Vol. 17. – P. 554–561.
90. Архипов О. Є. Аналіз даних та статистична обробка сигналів: методичні вказівки до комп’ютерного практикуму для студентів Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ» спеціальності 8.080201 "Прикладна математика" / О. Є. Архипов, С. А. Архіпова. – К. : НТУУ«КПІ», 2012. – 82 с.
91. Носко В. П. Введение в регрессионный анализ / В. П. Носко. – М. : НФПК, 2002. – 273 с.
92. Калинина В. Н. Математическая статистика / В. Н. Калинина, В. Ф. Панкин. – М. : Высш. шк., 2001. – 336 с.
93. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло в вычислительной математике (вводный курс) / С. М. Ермаков. – СПб : Невский диалект, 2009. – 192 с.
94. Генсірук С. А. Ліси України / С. А. Генсірук. – К. : Вид-во "Наук. думка", 1992. – 408 с.

95. Chianucci F. Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: current controversies and opportunities / F. Chianucci, A. Cutini // iForest –Biogeosciences and Forestry, 2012. – Vol. 5. – P. 290–295.
96. Козак І. Приклади метризації і прогнозування біомаси соснових деревостанів у Польщі / І. Козак, П. Стшелінський, А. Венгель, Т. Завіала-Недзвецький, М. Засада, А. Стемпень, П. Коцюба, Г. Козак // Вісник Львівського університету. Серія географічна. – 2014. – Вип. 45. – С. 20–28.
97. Костецька Я. М. Геодезичні прилади. Частина 2. Електронні геодезичні прилади / Я. М. Костецька. – Львів : Престиж інформ, 2000. – 324 с.
98. Черняга П. Г. Спутникова геодезія. Частина 1. Теоретичні відомості / П. Г. Черняга. – Рівне : НУВГП, 2012. – 118 с.
99. Huete A. Modis vegetation index (MOD13): [Електронний ресурс] / Version 3. Algorithm theoretical basis document – NASA, MODIS-WEB, 1999. – Режим доступу: <http://modis.gsfc.nasa.gov>.
100. Вайс А. А. Классификация деревьев и горизонтальная структура ценозов / А. А. Вайс // Научный журнал КубГАУ. – 2007. – № 31(7). – С. 1–13.
101. Букша І. Ф. Методичні рекомендації з моніторингу лісів України I рівня / І. Ф. Букша, М. В. Банік. – Харків : Вид-во УкрІДІЛГА, 2009. – 48 с.
102. Самойлович Г. Г. Таксация полога насаждений / Г. Г. Самойлович // Лесная таксация : указания к дипломному проектированию. – Л. : ЛоЛЛТА, 1968. – С. 47–89.
103. Рожков С. Н. Стереоскопия в кино-, фото-, видеотехнике / С. Н. Рожков, Н. А Овсянникова. – М. : Парадиз, 2003. – 136 с.
104. Hagstrom S.T. Voxel-Based LIDAR Analysis and Applications : PhD dissertation : Shea T. Hagstrom ; Carlson Center for Imaging Science Rochester Institute of Technology. – USA, 2014. – 254 pp.
105. Wu B. A Voxel-Based Method for Automated Identification and Morphological Parameters Estimation of Individual Street Trees from Mobile

Laser Scanning Data / B. Wu, B. Yu, W. Yue, S. Shu, W. Tan, C. Hu, Y. Huang, J. Wu and H. Liu // Remote Scanning, 2013. – Vol. 5. – P. 584–611.

106. Fernandes R. Evaluating image-based estimates of leaf area index in boreal conifer stands over a range of scales using high-resolution CASI imagery / R. Fernandes, J. Miller, J. Chen, I. Rubinstein // Remote Sensing of Environment, 2004. – Vol. 89. – P. 200–216.

107. Schlerf M. Derivation of Forest Leaf Area Index From Multi- and Hyperspectral Remote Sensing Data / M. Schlerf, C. Atzberger, M. Vohland, H. Buddenbaum, S. Seeling, J. Hill // EARSeL eProceedings 3, 2004. – P. 405–413.

108. Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs / Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, Canada ; Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, N.Y., USA. – 1999. – P. 36.

109. Zhao K. Lidar-based mapping of leaf area index and its use for validating Globcarbon satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA / K. Zhao, S. Popescu // Remote Sensing of Environment, 2009. – Vol. 113. – P. 1628–1645.

110. Strzelinski P. Szacowanie zasobów węgla w lasach z wykorzystaniem technik geomatycznych / P. Strzelinski, A. M. Jagodziński, A. Wencel, T. Zawiła-Niedźwiecki // Techniki geomatyczne w inwentaryzacji lasu – potrzeby i możliwości. – Warszawa : Wyd. SGGW, 2008. – S. 114–125.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця

Програмне забезпечення для опрацювання лідарних даних

№	Назва	Ліцензія	Розширення або інструмент	Ресурс
1	LasTools	безкоштовно	*.exe, ArcGIS	http://www.cs.unc.edu
2	QGIS	безкоштовно	*.exe	http://www.qgis.org
3	Fugroviewer	безкоштовно	*.exe	http://www.fugroviewer.com
4	LIDAR & IFSAR TOOLS	безкоштовно	*.exe	http://forsys.cfr.washington.edu
5	BCAL LiDAR	безкоштовно	ENVI	http://bcal.geology.isu.edu
6	libLAS	безкоштовно	OSGeo4W	http://liblas.org
7	GRASS	безкоштовно	Python	http://grass.osgeo.org
8	OPALS	безкоштовно	Python	http://www.ipf.tuwien.ac.at
9	QGIS	безкоштовно	*.exe	http://www.qgis.org
10	VG4D viewer Virtual Geomatics	безкоштовно	*.exe	http://www.virtualgeomatics.com
11	LP360	комерційна	ArcGIS	http://www.qcoherent.com
12	Pointtools Viewer 1.7	комерційна	*.exe	http://www.pointools.com
13	TerraSolid	комерційна	MicroStation	http://www.terrasolid.fi
14	Eognition	комерційна	*.exe	http://www.ecognition.com
15	ERDAS IMAGINE	комерційна	*.exe	http://geospatial.intergraph.com

Додаток Б

Моделювання вокселя з ЛД на мові python

```

@python -x %~dpf0 %* & goto :eof
import sys
D = 1
def load(fname):
    data = []
    with open(fname, 'r') as fd:
        for line in fd:
            data.append([float(x) for x in line.split()[:3]])
    return data
def gruppings(data, D):
    X0, Y0, Z0 = map(lambda i: min(a[i] for a in data), range(3))
    def xround(x, x0, d): return round(float(x - x0) / d) * d + x0
    counter = {}
    for (x, y, z) in data:
        x = xround(x, X0, D)
        y = xround(y, Y0, D)
        z = xround(z, Z0, D)
        k = (x, y, z)
        try:
            counter[k] += 1
        except:
            counter[k] = 1
    gen = ((x, y, z, n) for (x, y, z), n in counter.iteritems())
    return sorted(gen, reverse = True)
def out(fd, data):
    write = fd.write
    for row in data:
        write(" ".join(str(x) for x in row) + "\n")
argv = sys.argv[:]
for i in ('-help', '--help', '-h'):
    if i in argv:
        wr = sys.stderr.write
        wr('Usage: xyzv [-D value] input [output]')
        wr("\n")
        sys.exit(1)
i = 0
while i < len(argv):
    if argv[i] == '-D':
        D = float(argv[i+1])
        del argv[i:i+2]
    else:
        i += 1

if len(argv) == 3:
    with open(argv[2], 'w') as fd:
        out(fd, gruppings(load(argv[1]), D))
elif len(argv) == 2:
    out(sys.stdout, gruppings(load(argv[1]), D))

```

Додаток В

Розрахунок надземної фітомаси в програмному середовищі Scilab

```

clear();

function mass=phytomass(height,crown,timber) // phytomass calculation
    dbh=(-3.24e-2+9.3e-3*height+5.3e-3*crown)*1e2;
    trunkvol=exp(-2.592)*dbh.^1.912.*height.^0.861/1e3;
    barkfrac=exp(4.58)*dbh.^-0.116.*height.^-0.657;
    barkvol=trunkvol.*barkfrac/100;
    age=exp(2.139)*dbh.^0.378.*height.^0.253;
    phytofresh=exp(-2.479)*dbh.^2.493.*height.^-0.881.*timber.^-0.333;
    boughfresh=exp(-2.621)*dbh.^3.066.*height.^-1.339.*timber.^-0.642;
    trunkden=exp(5.62+1.58e-3*age).*age.^9.68e-2;
    trunkmass=(trunkvol-barkvol).*trunkden;
    barkden=exp(5.994+5.01e-3*age).*age.^-0.163;
    barkmass=barkvol.*barkden;
    leaffrac=0.667;
    leaffresh=phytofresh.*leaffrac;
    leafdry=0.43;
    leafmass=leaffresh.*leafdry;
    crownfresh=boughfresh+(phytofresh-leaffresh);
    crownden=exp(5.028+2.45e-3*age).*age.^0.282;
    twigden=exp(6.003+6.94e-3*age).*age.^0.315;
    crownmass=crownfresh.*crownden./twigden;
    mass=trunkmass+barkmass+crownmass+leafmass;
endfunction

```

```

X=read('\Path\Phytomass.csv',-1,2);
n=size(X,1); P=0.48;
Y=phytomass(X(:,1),X(:,2),P);
dat=mopen('\Path\Phytomass.dat','wt');
for i=1:n, mfprintf(dat,"%0.9f\n",Y(i)); end;
mclose(dat);

// exec('\Path\Phytomass.sci');

```

Додаток Г

Розрахунок точності запропонованого методу на основі застосування методу Монет-Карло в програмному середовищі Scilab

```
// Phytomass calculation by lidar data
// SciLab v5.5.2 Script, 2015
clear(); stacksize('max');

function mass=phytomass(height,crown,dbh,timber) // phytomass calculation
    trunkvol=exp(-2.592)*dbh.^1.912.*height.^0.861/1e3;
    barkfrac=exp(4.58)*dbh.^-0.116.*height.^-0.657;
    barkvol=trunkvol.*barkfrac/100;
    age=exp(2.139)*dbh.^0.378.*height.^0.253;
    phytofresh=exp(-2.479)*dbh.^2.493.*height.^-0.881.*timber.^-0.333;
    boughfresh=exp(-2.621)*dbh.^3.066.*height.^-1.339.*timber.^-0.642;
    trunkden=exp(5.62+1.58e-3*age).*age.^9.68e-2;
    trunkmass=(trunkvol-barkvol).*trunkden;
    barkden=exp(5.994+5.01e-3*age).*age.^-0.163;
    barkmass=barkvol.*barkden;
    leaffrac=0.667;
    leaffresh=phytofresh.*leaffrac;
    leafdry=0.43;
    leafmass=leaffresh.*leafdry;
    crownfresh=boughfresh+(phytofresh-leaffresh);
    crownden=exp(5.028+2.45e-3*age).*age.^0.282;
    twigden=exp(6.003+6.94e-3*age).*age.^0.315;
    crownmass=crownfresh.*crownden./twigden;
    mass=trunkmass+barkmass+crownmass+leafmass;
endfunction
```

```
imprintf("\n Phytomass by lidar validation\n");
n=180; // actual number of trees
m=152+2; // detected number of trees, 0.84 accuracy
imprintf(' number of trees = %u\n',n);
S=0.28; // test area, ha
```

```

mprintf(' test area = %.2f ha\n',S);
hmean=23.03; hdev=1.7;
mprintf(' trees height = %.2f ± %.1f m\n',hmean,hdev);
cmean=15.32; cdev=8.2;
mprintf(' crowns area = %.2f ± %.1f sq.m\n',cmean,cdev);
T=read('SPECIAL\ASPIRANT\SEMKO\DBH.CSV',n,1); // tls dbh, m
stand=sum(%pi*T.^2/4)/S/45.9; // forest TLS normality
mprintf(' forest TLS normality = %.3f\n',stand);

test=1e3; // number of Monte-Carlo tests
mprintf(' number of Monte-Carlo tests = %u\n',test);
progress=waitbar('statistical testing: '+string(test));
for i=1:test,
    grand("setsd",getdate("s")); // set random generator seed
    H=grand(n,1,"nor",hmean,hdev); // random heights
    C=grand(n,1,"nor",cmean,cdev); // random crowns
    Y=phytomass(H,C,1e2*T,stand); // ground-truth phytomass, kg
    truemass(i)=sum(Y); // overall ground-truth phytomass, kg
    D=(-3.24e-2+9.3e-3*H+5.3e-3*C); // lidar dbh, m
    timber(i)=sum(%pi*D.^2/4)/S/45.9; // forest lidar normality
    X=phytomass(H,C,1e2*D,timber(i)); // lidar calculated phytomass, kg
    calcmass(i)=sum(X(1:m)); // overall calculated phytomass, kg
    Z(i)=calcmass(i)/truemass(i)-1; // relative error
    waitbar(i/test,'statistical testing: '+string(test-i),progress);
end;
close(progress);

mprintf(' forest lidar average normality = %.3f\n',mean(timber));
mprintf(' forest TLS average phytomass = %.3f kg\n',mean(truemass));
mprintf(' forest lidar average phytomass = %.3f kg\n',mean(calcmass));
mprintf(' phytomass mean percentage error = %.3f %\n',1e2*mean(Z),'%');
F=find(abs(Z)==max(abs(Z)));
mprintf(' phytomass maximum percentage error = %.3f %\n',1e2*Z(F(1,1)),'%');
mprintf(' phytomass validation complete\n');
// exec('SPECIAL\ASPIRANT\SEMKO\LIDAR.SCI');

```