



Висновок та перспективи досліджень. У статті проаналізовано геометричну точність стереопари космічних знімків із супутника WorldView-2 у частині можливості їх використання для топографічних цілей. Експериментальні дослідження включали побудову цифрової моделі місцевості зі стереопари панхроматичних зображень, підвищення чіткості мультиспектрального зображення за допомогою панхроматичного спектрального діапазону та ортотрансформування лівого знімка стереопари за допомогою отриманої ЦММ. У результаті було одержано кольоровий ортофотознімок. Оцінювання його точності виконано за відхиленнями координат п'ятнадцяти виміряних на ортознімку контрольних точок. Еталонні координати взято з векторного плану масштабу 1:1000 на територію м. Одеси. Ортознімок було отримано за моделлю RPC з використанням одержаної зі стереопари ЦММ та без будь-яких опорних точок. Встановлено, що СКП твердих контурів на отриманому ортознімку не перевищує 3 м (6 пікселів растру) і задовольняє вимоги точності для карт масштабу 1:10 000. Це важливо економічно, адже дозволяє створювати ортофотокarti масштабу 1:10 000 за допомогою космічних знімків без їх наземної прив'язки. Використання інших моделей сенсора та опорних точок для досягнення вищої геометричної точності кінцевих ортознімків може бути предметом подальших досліджень.

Подяка. Автор висловлює вдячність українській компанії TVIS (<http://www.tvvis.com.ua/>) за надання стереопари WorldView-2.

Література

1. *Онъков, И.В.* Исследование геометрической точности ортоснимков WorldView-2, созданных с использованием цифровой модели рельефа Земли SRTM / И.В. Онъков // Геоматика. – 2011. – № 4. – С. 56-63.

2. *Онъков, И.В.* Сравнительная оценка геометрической точности ортоснимков WorldView-2 / И.В. Онъков // Геопроектирование. – 2013. – № 1. – С. 19-22.

3. *Основні положення створення та оновлення топографічних карт масштабів 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000.* – К.: Укргеодезкартографія, 1999. – 18 с.

4. *Grodecki, J.* Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials / J. Grodecki, G. Dial // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2003. – Vol. 69. – P. 59-68.

5. *Li, R.* Integration of Ikonos and QuickBird Imagery for Geopositioning Accuracy Analysis / Rongxing Li, Feng Zhou, Xutong Niu, Kaichang Di // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2007. – Vol. 73. – P. 1067-1074.

6. *Maglione, P.* Using WorldView-2 satellite imagery to support geoscience studies on Phlegraean area / P. Maglione, C. Parente, A. Vallario // American Journal of Geosciences. – 2013. – Vol. 3. – P. 1-12.

Інтернет-джерела

7. *National spatial data infrastructure. Geospatial Positioning Accuracy Standards. Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy / Subcommittee for Base Cartographic Data Federal Geographic Data Committee.* – Реж. доступу: <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>

8. *Poli, D.* Radiometric and geometric analysis of WorldView-2 stereo scenes / D. Poli, E. Angiuli, F. Remondino. – Реж. доступу: http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part1/03/03_04_Paper_188.pdf

9. *Whitepaper.* The benefits of the 8 Spectral Bands of WorldView-2 / DigitalGlobe Inc. – Реж. доступу: http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DG-8SPECTRAL-WP_0.pdf

10. *WorldView-2.* Geolocation accuracy / DigitalGlobe Inc. – Реж. доступу: http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/WorldView_Geolocation_Accuracy.pdf

Надійшла 26.05. 14

* * *

УДК 528.854.4:528.88

І. Д. Семко

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИДІЛЕННЯ ОКРЕМИХ ДЕРЕВ У ЛІСОВОМУ МАСИВІ ЗА ДАНИМИ ЛІДАРНОГО ЗНІМАННЯ

Рассматривается актуальная проблема автоматизированного выделения деревьев в лесном массиве по данным дистанционного зондирования. Обосновываются методы и алгоритмы автоматизированного выделения отдельного дерева в лесном массиве по данным лидарной съемки. Приведены результаты расчетов морфоструктурных параметров древостоя, а именно количества деревьев на единицу площади, средних значений высоты деревьев, площадей проективного покрытия с помощью известных автоматических методов. Произведена оценка точности этих методов.

A topical problem of automated detection of single tree within forestry using remote sensing data is considered. The brief review of methods for detection of single tree using airborne LiDAR data is represented. Results of calculations of morphologic parameters with help of some automated methods namely the number of trees per unit area, the mean values of tree height, the projective cover are described. The accuracy of these methods has been validated.

Вступ. Для отримання точної та оперативної інформації про ліси фахівці з лісового господарства все

частіше звертаються до методів і технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [1-5 та ін.]. Спостереження за лісовими масивами на основі матеріалів ДЗЗ дозволяє створювати різноманітні тематичні

© І. Д. Семко, 2014



карти, у т. ч. і для геоінформаційних систем лісогосподарського призначення.

Аналіз деревостану на рівні найменшої структурної одиниці, тобто одного дерева, є важливим питанням для ведення точного лісового кадастру. Виокремлення дерев у лісовому масиві забезпечує поліпшену видову класифікацію, яка здійснюється методом аналізу спектральних даних у кожній кроні [8]. Визначення положення та параметрів крони дерева може бути використане як математична змінна для моделювання структурних та алометричних рівнянь, без яких не обійтися в процесі інвентаризації і таксації лісів [2,3,10].

До недавнього часу задача виділення окремих дерев на аерокосмічних знімках вирішувалась переважно візуальним аналізом стереопари [2,3], але такий метод потребує значних зусиль і часу. Тому в останні роки велика увага приділяється автоматизації виділення дерев, розробленню методів і алгоритмів, які дозволяють на основі багатоспектральних аерокосмічних зображень і даних лідарного знімання частково або повністю автоматизувати процес вирішення означеної задачі [1,3,10,19]. У даній статті проведено порівняльний аналіз відомих методів автоматизованого виділення окремих дерев у лісовому масиві за даними лідарного знімання.

Контекст і постановка задачі. Аналіз літературних джерел [2,6,7] свідчить, що дистанційне автоматичне виділення одного дерева може здійснюватися на основі аналізу як багатоспектральних аерокосмічних зображень (БАЗ), так і лідарних даних (ЛД), що й відображено на мал. 1.

ідеальних випадках ці максимуми будуть означати початок крони (тобто найвищу точку крони – пік), яка освітлюється сонячним світлом. При цьому слід зазначити, що при використанні аерофотознімків виявлення крон дерев можливо тільки тоді, коли між кронами нема перекриття.

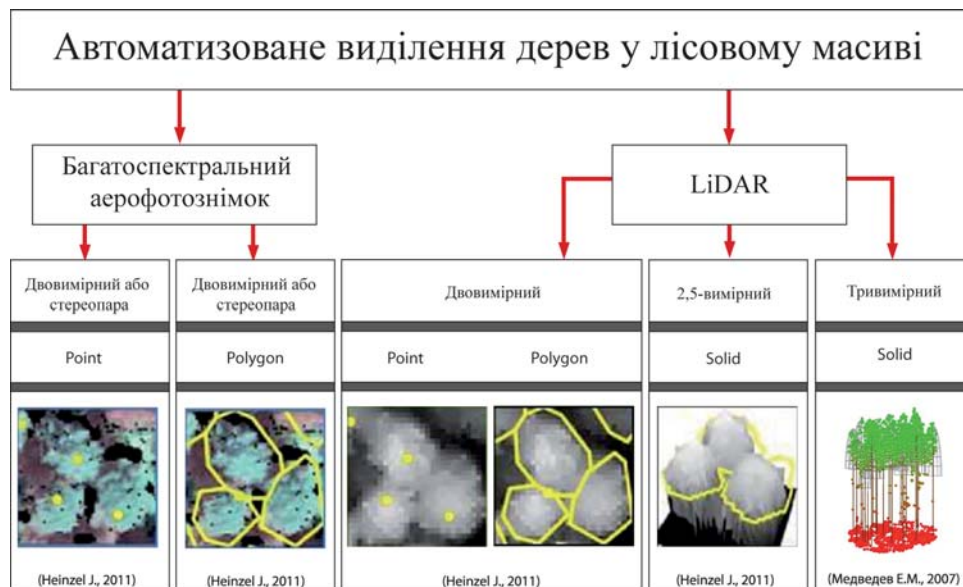
Пасивний принцип формування зображення, який покладено в конструкцію більшості відомих сучасних технічних засобів багато- та гіперспектрального знімання, суттєво обмежує можливості отримання оцінок розподілу характеристик і параметрів об'єктів на різних відстанях (висотах, ярусах). Разом з тим одержання означених величин можливе із застосуванням активних лідарних систем, в яких зображення розташованих на місцевості об'єктів формуються енергією імпульсів лазерного випромінювання, відбитого від цих об'єктів [14].

Автоматичне визначення положення дерев та розмежування їх крон з використанням аерофотознімків можливе тільки у двовимірному просторі (2D) [11,18], а для лідара можна застосувати двох з половиною вимірний (2,5D) або тривимірний (3D) опис об'єкта. 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 . Кожна точка може мати тільки одне значення Z . Таким чином, третій вимір часто використовується для представлення атрибутивного значення, а не просторової координати; приклад таких моделей зображено на мал. 3.

Мета даної статті – порівняти методи автоматизованого виділення окремих дерев у лісовому масиві за даними лідарного знімання та визначення морфоструктурних параметрів деревостану, а саме встановлення кількості дерев на одиницю площі, середніх значень висоти дерев, площ проективного покриття деревостанів, а також аналізування обраних методик виокремлення дерев та проведення оцінювання точності кожного методу.

Територія дослідження і вхідні дані. Як полігон для досліджень було використано частину ділянки лісу площею порядку 25 га на території лісництва Мартев надлісництва Тучно Західнопоморського

воєводства Польщі (координати центра ділянки: $E 16^{\circ} 05'42''$ $N 53^{\circ} 11'38''$). Особливості ділянки – переважає хвойна рослинність (соснові деревостани) з різним віковим складом (мал. 2). На означену



Мал. 1. Методи автоматизованого виділення одного дерева за даними ДЗЗ

Використання багатоспектральних аеро- та космічних знімків для визначення положення кожного дерева в багатьох випадках полягає у виявленні локальних максимумів інтенсивності. В

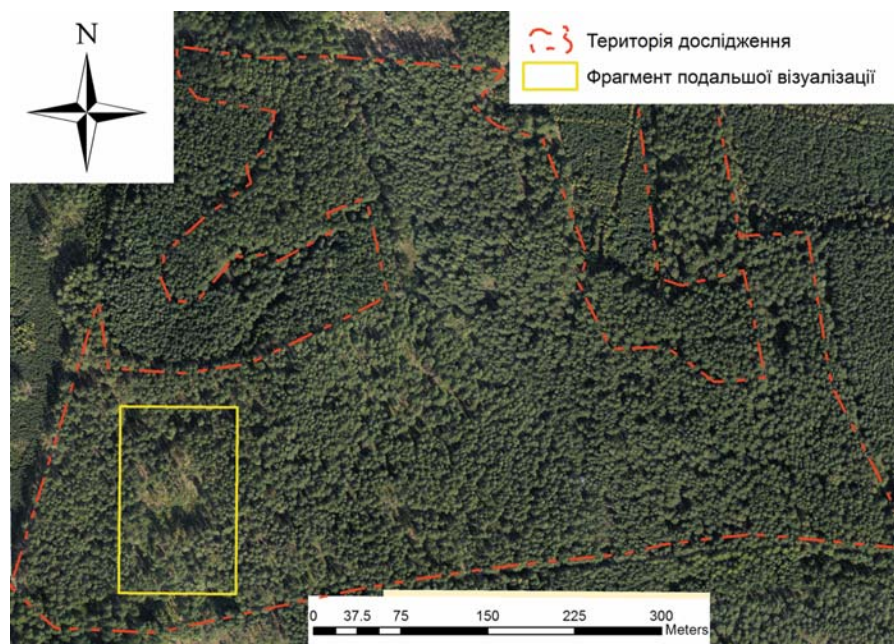


ділянку було отримано лідарні дані та аерофото-знімки.

ЛД одержано за допомогою авіаційного лазерно-локаційного сканера Ortech ALTM з такими характеристиками [www.optech.com]: робоча довжина хвилі 1,064 мкм; розрізненість по висоті від 5 до 35 см (в залежності від висоти знімання); розрізненість на місцевості близько 40-ка точок на 1 м²; можливість роздільної фіксації чотирьох імпульсів по дальності; динамічний діапазон сигналу становить 12 біт.

Аерофотознімок одержано за допомогою аерофотокамери Microsoft Vexcel UltraCam X з такими характеристиками [www.microsoft.com]: фокусна відстань – 100,5 мм; розмір знімка еквівалент – 230×150 мм; розмір зображення – 14430×9420 точок; розмір пікселя – 7,2 мкм; захоплення поперек / уздовж маршруту – 55° / 37° відповідно; розрізнявальна здатність при висоті знімання $h = 500/300$ м – 3,6 / 2,2 см. Аерофотознімок використовувався в роботі для полегшення вивчення території.

Крім того, в процесі дослідження також залучалися дані, отримані шляхом візуальних спостережень об'єктів території дослідження.



Мал. 2. Територія дослідження

Аналіз методик виокремлення дерев за даними лідара. Оброблення ЛД можливе в трьох варіантах просторового опису об'єкта (див. мал. 1). Інформацію про кожне дерево можна отримати двома способами: через оброблення растрової інформації у 2D- і 2,5D-виді та в ході аналізу векторної інформації у 3D.

При аналізі 2D за вхідний матеріал служить растр, значення пікселів якого можуть мати будь-яку атрибутивну інформацію з ЛД (інтенсивність, номер повернення, значення RGB тощо). Оброблення 2,5D полягає в отриманні центральної моде-

лі місцевості (ЦММ) із хмари точок. У даному випадку ЦММ використовується так само, як і спектральна яскравість зображення, але має перевагу при класифікації градацій сірого, тому що кожен піксел вказує на реальну висоту, а не на спектральну яскравість [13]. Використання 3D-методу полягає в детальнішому аналізі хмари точок, тобто розгляд "лазерного портрета" у тривимірному просторі, що дозволяє отримати об'ємні показники окремого дерева, а не тільки морфоструктурні показники плато [15].

На сьогодні розроблено багато алгоритмів для автоматизованого виявлення 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 [9].

Алгоритм 2: моделювання вокселів дерева на основі необроблених імпульсів лазера. Воксел (від англ. volume – об'єм та pixel – піксел) – це елемент просторового зображення, з яких складається растр у тривимірному просторі (аналогічний пікселю в двовимірних зображеннях) [22].

Алгоритм 3: 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 (сухостою, хворі дерева, хвойне дерево серед листяних та навпаки) [7].

Алгоритм 4: метод локальних максимумів з регулюванням надлишку висоти шляхом зміни кількості згладжувань, тобто зміною рівня інтерполяції для початкової фільтрації в ЛД або зміною значення гауссівського фільтра 3×3 (на думку авторів публікації [20], таке згладжування найбільш дієве для різних наборів даних).

Алгоритм 5: сегментація на основі моделювання геометрії крони. Цей метод заснований на гаусівському згладжуванні кореляційної поверхні, яка обчислюється з урахуванням геометричної моделі та значень висоти плато [12].

Алгоритм 6: адаптивна фільтрація на основі значень висоти плато. Модель висоти за допомогою цього методу будується на основі інтерполяції в сітці з кроком 0,5 м, приймаючи максимальне значення висоти в даній чарунці [16,17].

Нижче буде розглянуто три варіанти просторового опису об'єкта і деякі алгоритми автоматизованого



виділення дерев, які найшвидше чи найпростіше реалізувати при використанні геоінформаційних технологій.

Оброблення лідарних даних. За вхідний матеріал для аналізу 2D та 2,5D із первинних даних хмари точок лідара було створено растрове зображення з розрізнявальною здатністю 0,5 м з такою інформацією для кожного пікселя: найбільше значення інтенсивності для 2D та найбільше значення висоти для 2,5D. Дане перетворення ЛД в растрову форму було проведено з використанням інструменту "Point to Raster", ArcGIS.

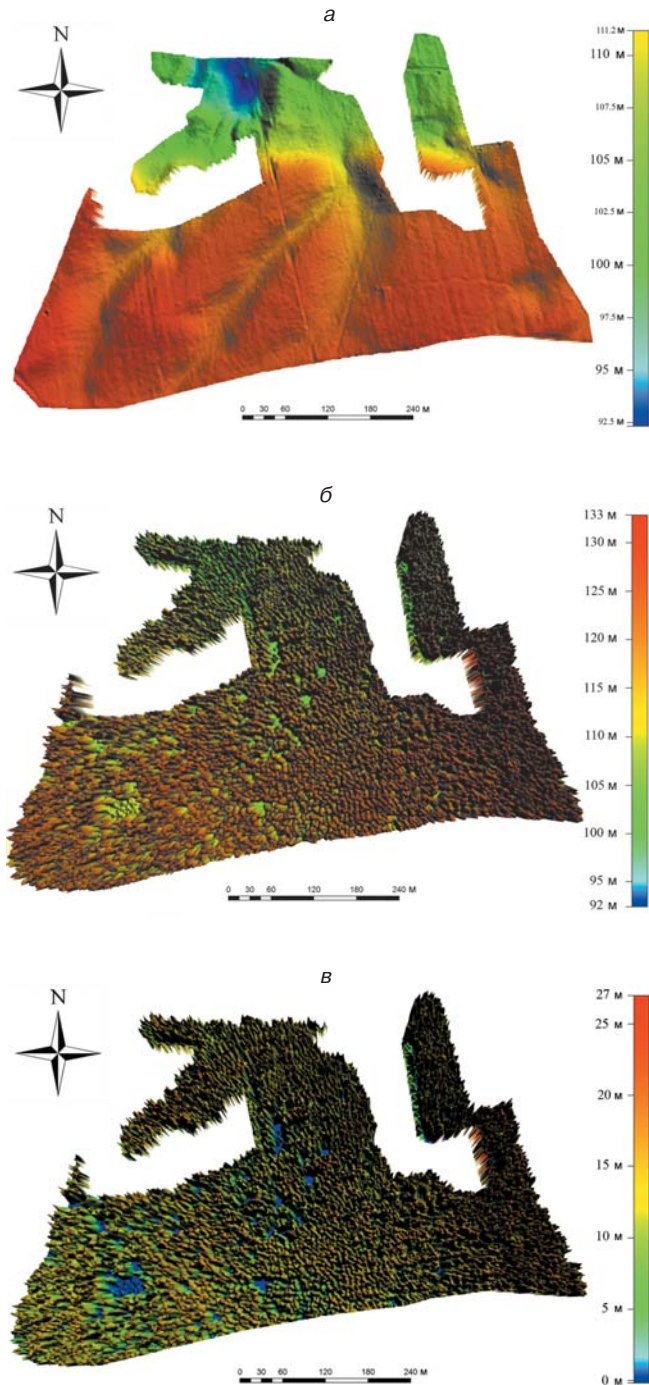
Наступним кроком стало знаходження локальних максимумів, які в подальшому розглядалися як вершини дерев. Піксел вважається локальним максимумом, коли сусідні піксели отримали менше значення або не належать до групи даного пікселя. Точки, які розташовувалися занадто близько одна до одної, виключалися на основі критерію *пошуку 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 вилучені. Таким чином, для молодих дерев локальний максимум знаходиться на піку крони, а відстань між точками буде порівняно більша. У даному дослідженні було вирішено використовувати поріг у 3 м.

Для визначення висоти дерев розраховано нормалізовану ЦММ (нЦММ). Цю модель створено методом віднімання значень висоти ЦММ од відповідних значень ЦМР [5]. ЦММ і ЦМР були розраховані з первинних даних хмари точок лідара з розрізнявальною здатністю 0,5 м. ЦММ, ЦМР та нЦММ зображено на мал. 3.

Класифікація вхідних даних лідара для отримання ЦМР проводилася з використанням функції "las-ground" у програмному середовищі LasTools. Нормалізацію ЦММ здійснено для усунення впливу рельєфу місцевості та отримання абсолютної висоти кожної точки над землею. Різниця висоти між точкою локального максимуму і точкою основи (надирна точка) розглядалася як нормована висота точки, тобто абсолютна висота. Таким чином, локальні максимуми зі значеннями менше 3 м були вилучені, тому що їх можна віднести до категорії кущів порослі лісу, до помилок алгоритму тощо [5].

Розмежування крони для 2D проводилось на основі використання полігонів Вороного (Voronoi polygons) у векторному вигляді навколо локальних максимумів з використанням некерованої класифікації k -середніх (див. алгоритм 1). Результат визначення локальних максимумів та розмежування крон з використанням 2D-опису об'єкта відображено на мал. 5.

Окреслення крони у 2,5D-описі об'єкта проводилось з використанням методу автоматизованої ідентифікації лінії вододілів [21] та методу регулювання надлишку висоти локальних максимумів (алгоритм 4).



Мал. 3. Цифрові моделі:
а – ЦМР, тобто модель "істинної землі" або рельєфу;
б – ЦММ або поверхня рослинного покриву;
в – нЦММ або нормалізована висота рослинного покриву

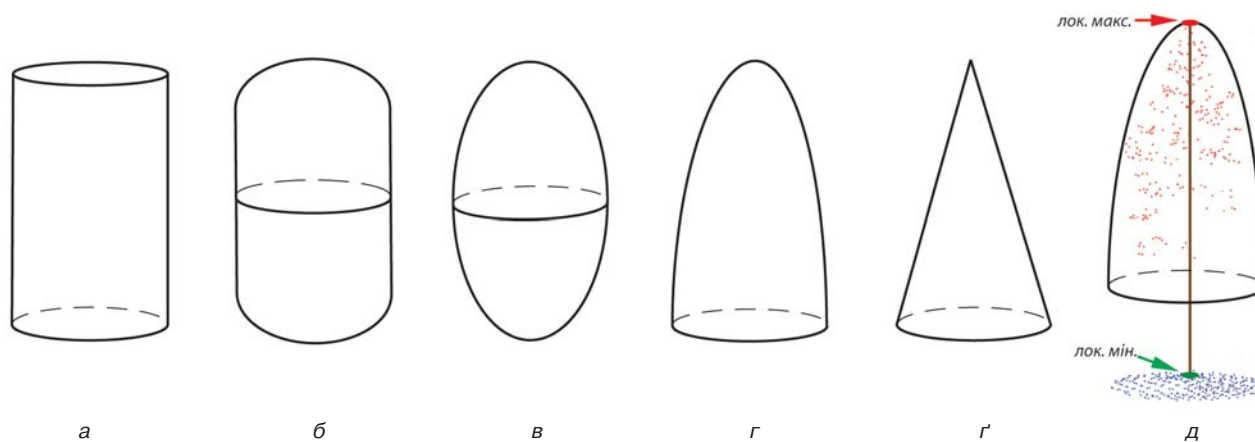
Виявлення дерев із застосуванням 3D-опису об'єкта – наразі найменш досліджений метод. Більшість методів полягає у виокремленні дерев з лідарної хмари точок шляхом кластеризації, тобто згрупування точок, які належать до тієї ж крони дерева за окремими параметрами. Результат виділення дерев у 3D найближчий до реальності, але такий метод потребує підвищених вимог до даних і тривалого часу на оброблення [22].



Виокремлення дерев у 3D-описі об'єкта проводилось на основі моделювання геометрії крон (див. алгоритм 5). Для точної класифікації за цим методом вирішальним чинником є саме визначення геометричної форми крони. 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 (мал. 4). Для виявлення хвойних дерев найкращі моделі, зображені в позиції *в*, *г*, *г* (в даному дослідженні було використано модель *з*).

графічно відтворено результати оброблення лідарних даних у трьох варіантах просторового опису об'єкта, а в табл. 1 наводяться результати виділення дерев у межах території дослідження.

Зазначимо, що ідентифікувати дерева безпосередньо в лісі не було можливості. Тому верифікацію результатів провели з використанням еталону дерев, виявленого за допомогою методів фотограмметрії. Для цього на території дослідження було обрано три довільні ділянки, приблизно по 40 м² кожна, де за допомогою анагліфічного зображення хмари точок ЛД вручну було виявлено 127 еталонних

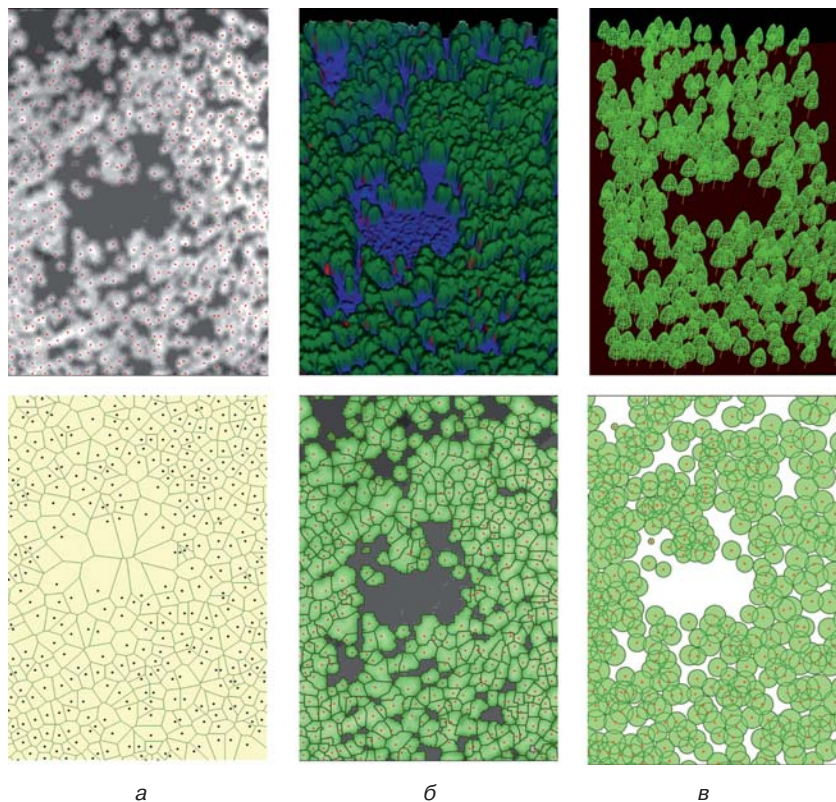


Мал. 4. Основні геометричні тіла для опису крон:
а – циліндр; *б* – видовжений сфероїд; *в* – сфероїд; *г* – параболоїд; *г* – конус;
д – наочний приклад кластеризації хмари точок лідара (синій колір – земля, червоний – рослинність)

Процес оброблення лідарних даних у 3D-описі об'єкта реалізовано за допомогою програмного забезпечення LasTools. Процес починається з класифікації та вилучення точок, що належать до землі. Точки, що залишилися, розділяються на два класи в залежності від висоти розташування відносно земної поверхні: 1) інші (не беруть участі у подальшій роботі) – розташовані над землею до висоти 1,3 м включно; 2) рослинність – розташовані вище вказаної висоти (див. мал. 4, *д*).

Висота дерева обраховувалась аналогічним способом, тобто після виявлення локальних максимумів було визначено локальні мінімуми як перпендикуляр, проведений від максимуму до землі (мал. 4, *д*). Різниця між локальним максимумом і мінімумом вважається абсолютною висотою дерева. Результат виокремлення дерев у 3D-описі об'єкта відображено на мал. 5, *в*.

Результати оброблення даних та оцінювання точності. На мал. 5



Мал. 5. Результат виокремлення дерев різними методами:
а – 2D; *б* – 2,5D; *в* – 3D



Таблиця 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

дерев. Основними критеріями при цьому були: чіткість крони еталонного дерева, наявність точок стовбурної частини дерева, значне зменшення щільності точок на землі.

Перевірку результатів та оцінювання точності здійснено на основі просторового взаємозв'язку між визначеними та еталонними деревами. Результати зведено у табл. 2. Оцінювання точності виконано в 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, а 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 (HM – height measurement).

Середньоквадратичну похибку (RMSE – Root Mean Square Error) розраховано за формулою

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

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

Таблиця 2. Точність методів виявлення дерев

Метод	Виявлено дерев		Не виявлено, од.	FAE, од.	RMSE_TLE, м	RMSE_HM, м
	од.	%				
2D	70	55,1	57	2	0,92	1,63
2,5D	97	76,4	30	5	1,62	1,79
3D	69	54,3	58	0	0,78	1,52

Таким чином, згідно з даними табл. 2, найкращий результат виділення дерев у лісовому масиві можна отримати із застосуванням методу 2,5D, але точніші за просторовими показниками способи 3D і 2D.

Втім, при використанні полігонів Вороного у 2D виникає проблема підрахунку проективного покриття. Очевидна перевага 2D і 2,5D-підходів над 3D-методом у швидкості й мобільності оброблення. Перші два методи легко поєднуються з іншою інформацією у вигляді растру тієї ж розмірності. Зате перевагою 3D-методу є можливість об'ємної візуалізації об'єкта для більш детального його вивчення.

Висновок та перспективи досліджень. У статті стисло описано існуючі методи й алгоритми автоматизованого виділення окремого дерева у лісовому масиві за даними лідарного знімання. Розглянуто три варіанти просторового опису об'єкта й алгоритми автоматизованого виділення дерев, які можна швидко і просто реалізувати з використанням геоінформаційних технологій. Наведено результати застосування обраних методів визначення морфоструктурних параметрів деревостану, а саме встановлення кількості дерев на одиницю площі, середніх значень висоти дерев, площ проективного покриття. Проведено оцінювання точності результатів обраних методик на основі просторового взаємозв'язку між визначеними та еталонними деревами.

Наступні кроки дослідження мають бути спрямовані на підвищення точності виділення окремих дерев шляхом модифікації алгоритмів виявлення локальних максимумів.

Дослідження було підтримано Фондом фундаментальних досліджень України в рамках наукового проекту № Ф54.2/019 "Оцінювання характеристик рослинних об'єктів на основі комплексування даних спектрополяризаційних вимірювань і матеріалів аерокосмічних зйомок".

Подяки. Автор висловлює вдячність Ігорю Козаку, Андржею Венглю та Павлу Штелінські за надання матеріалів лідарної зйомки у рамках проекту NN 309 014638 "Застосування моделі FORKOME до прогнозування алокації та акумуляції біомаси в деревостанах сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.)" за підтримки Міністерства науки та вищої освіти Польщі.

Література

1. Багатоспектральні методи ДЗЗ в задачах природокористування; за ред. В.І. Лялько і М.О. Попова. – К.: Наук. думка, 2006. – 360 с.
2. Данилин, І.М. Морфологическая структура, продуктивность и дистанционные методы таксации древостоев Сибири: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.03.02 / Данилин Игорь Михайлович; Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. – Красноярск, 2003. – 35 с.
3. Данилин, І.М. Оценка структуры и состояния лесного покрова на основе лазерного сканирования и цифровой аэро- и космической съемки / И.М. Данилин, Е.М. Медведев // География и природные ресурсы. – 2005. – Вып. 3. – С. 109-113.
4. Лакида, П.І. Фітомаса лісів України: монографія / П.І. Лакида. – Тернопіль: Збруч, 2002. – 256 с.
5. Попов, М.О. Оцінювання характеристик зелених насаджень з використанням засобів дистанційного зондування Землі / М.О. Попов, І.Д. Семко // Основи природокористування та безпека життєдіяльності. – 2013. – Вып. 12. – С. 51-62.
6. Changok, Lim. Estimation of Urban Tree Crown Volume based on Object-oriented approach and LIDAR Data / L. Changok. – Observation in partial fulfilment of



the requirements for the degree of Master of Science Geoinformation Science and Earth Observation.

7. *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. – 2012. – Vol. 33. – No.16. – P. 5171-5193.

8. *Gougeon, F.A.* Forest regeneration: individual tree crown detection techniques for density and stocking assessments / F.A. Gougeon, D.G. Leckie // International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry – Canada, 19.

9. *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.

10. *Hayward, C.* Estimating the significant above ground biomass of Amazonian rain forest using low altitude aerial videography / C. Hayward, D. Slaymaker // American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, May, 16-18, 2001.

11. *Hildebrandt, G.* Single tree detection using Remote Sensing methods / G. Hildebrandt // Remote sensing and aerial photogrammetry, Germany. – 1996. – P. 67-84.

12. *Holmgren, J.* Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesting machinery / J. Holmgren, A. Barth, H. Larsson, H. Olsson // 10th International Conference on LIDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems. – 2010. – P. 327-335.

13. *Hyypä, J.* Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner / J. Hyypä, M. Inkinen // The Photogrammetric Journal of Finland. – 1999. – Vol. 16. – No. 2. – P. 27-42.

14. *Measures, R.M.* Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications / R.M. Measures // Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1992. – 510 p.

15. *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.

16. *Pitkänen, J.* Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model / J. Pitkänen, M. Maltamo, J. Hyypä, X. Wei Yu // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Freiburg, Germany. – 2008. – Vol. 36. – P. 188-191.

17. *Pitkänen, J.* Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maximal methods / J. Pitkänen // Canadian Journal of Forest Research. – 2001. – Vol. 31. – P. 832-844.

18. *Pouliot, D.A.* Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration / D.A. Pouliot, D.G. King, D.J. Pitt, F.W. Bel // Remote Sensing of Environment. – 2002. – № 82. – P. 322-334.

19. *Reitberger, J.* Combined tree segmentation and stem detection using full waveform LiDAR data / J. Reitberger, P. Krzysteck, U. Stilla // Remote Sensing and Spatial Information. – 2007. – Vol. 36. – No. 3. – P. 332-337.

20. *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.

21. *Wang, L.* Individual Tree-Crown Delineation and Treetop Detection in High-Spatial-Resolution Aerial Imagery / L. Wang, P. Gong, G. Biging // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2004. – Vol. 70. – No. 3. – P. 351-357.

22. *Wang, Y.* Lidar point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modeling in forest / Y. Wang, H. Weinacker, B. Koch // Sensors. – 2008. – Vol. 8. – No. 6. – P. 3938-3951.

Надійшла 22.04.14