

Калинич Іван Васильович<sup>1</sup>,  
декан географічного факультету

Ваш Ярослав Іванович<sup>1</sup>, старший викладач кафедри  
геодезії, землеустрою та геоінформатики

Ничвид Марія Романівна<sup>1</sup>, старший викладач кафедри  
геодезії, землеустрою та геоінформатики

<sup>1</sup>ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,

Kalynych Ivan<sup>1</sup>, Dean of the Faculty of Geography,  
<https://orcid.org/0000-0002-5213-3417>

Vash Yaroslav<sup>1</sup>, Senior Lecturer of the Department  
of Geodesy, Land Management and Geoinformatics,  
<https://orcid.org/0000-0002-7570-0437>

Nychvyd Mariya<sup>1</sup>, Senior Lecturer of the Department  
of Geodesy, Land Management and Geoinformatics  
<https://orcid.org/0000-0001-5661-8799>

<sup>1</sup>State University of Ukraine "Uzhgorod  
National University"

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНО НЕОБХІДНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ХМАРИ ТОЧОК АВІАЦІЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ДО ТОЧНОСТІ ТА ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНИХ УМОВ ТЕРИТОРІЇ

### METHODOLOGICAL PRINCIPLES FOR DETERMINING THE MINIMUM REQUIRED DENSITY OF THE POINT CLOUD OF AVIATION LASER SCANNING CONSIDERING REGULATORY REQUIREMENTS FOR ACCURACY AND PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL CONDITIONS OF THE TERRITORY

Калинич І. В., Ваш Я. І., Ничвид М. Р. Методологічні засади визначення мінімально необхідної щільності хмари точок авіаційного лазерного сканування з урахуванням нормативних вимог до точності та фізико-географічних умов території. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2026. Том 11. № 1. С. 311 – 315.

Kalynych I., Vash Y., Nychvyd M. Methodological principles for determining the minimum required density of the point cloud of aviation laser scanning considering regulatory requirements for accuracy and physical and geographical conditions of the territory. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*. 2026. Volume 11. № 1. pp. 311 – 315.

*У статті здійснено наукове обґрунтування взаємозв'язку між нормативними вимогами до висотної точності цифрових моделей рельєфу та мінімально необхідною щільністю хмари точок авіаційного лазерного сканування. Проаналізовано положення національної нормативної бази та міжнародних специфікацій щодо класифікації рівнів якості лідарних даних, зокрема підходи до інтегрованого оцінювання номінального інтервалу між імпульсами, їх сукупної щільності та вертикальної точності. На основі емпіричних залежностей між середньоквадратичною похибкою висот, щільністю точок і крутизною схилів встановлено аналітичний зв'язок, що дозволяє трансформувати нормативні значення похибки мінімально допустимі показники щільності для різних масштабів топографічної зйомки з урахуванням типу рельєфу та земного покриття. Обґрунтовано необхідність урахування втрат імпульсів у залісених районах і впливу морфометричної складності місцевості на ефективну щільність точок класу «Земля». Отримані результати формують методологічну основу для вдосконалення нормативного регулювання параметрів проектування авіаційного лазерного сканування.*

**Ключові слова:** авіаційне лазерне сканування, щільність хмари точок, цифрова модель рельєфу, висотна точність, нормативні вимоги, земний покрив, масштаб зйомки.

*This article substantiates a scientific approach to establishing the relationship between the regulatory requirements for the vertical accuracy of digital terrain models and the minimum required point-cloud density in airborne laser scanning. The study analyzes the current national regulatory acts regulating the accuracy of topographic surveying and compares them with international methodological approaches to classifying the quality of light detection and ranging data. It is shown that, in international practice, point density and vertical accuracy are considered interrelated quality parameters, whereas in the national regulatory framework, they are primarily determined by permissible mean square errors without explicit density thresholds. Based on empirical relationships among height error, point density, and terrain slope, an analytical framework is proposed to determine the minimum required ground point density to ensure compliance with established accuracy standards. Calculations were performed across different topographic map scales and terrain categories, accounting for geomorphological complexity and land-cover characteristics. The results confirm a consistent increase in the required density with increasing accuracy requirements and increasing terrain roughness. Special attention is paid to the discrepancy between the nominal pulse density and the effective density of ground points, especially in forested and vegetated areas, where pulse losses significantly affect the formation of the soil class. The study substantiates the need to introduce correction factors when planning airborne laser scanning missions to compensate for vegetation penetration limitations and slope-related interpolation errors. The results obtained provide a methodological basis for converting formal accuracy requirements into quantitatively justified density parameters and support further improvement and harmonization of national standards with international frameworks for light detection quality and ranging.*

**Keywords:** airborne laser scanning; point cloud density; digital terrain model; elevation accuracy; regulatory requirements; land cover; survey scale.

#### Вступ

Авіаційне лазерне сканування (АЛС) упродовж останніх десятиліть стало одним із ключових методів отримання високоточної просторової інформації для створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР), цифрових моделей місцевості (ЦММ) та топографічних матеріалів різних масштабів. Якість отриманих результатів безпосередньо залежить від комплексу параметрів знімання, серед яких одним із визначальних є щільність хмари точок.

У міжнародній практиці показники щільності імпульсів та вертикальної точності розглядаються як взаємопов'язані характеристики. Такий підхід базується на узгодженні номінального інтервалу між імпульсами, їх просторової густоти та допустимої середньоквадратичної похибки висот.

Водночас у чинній нормативній базі України встановлено гранично допустимі значення середніх квадратичних похибок визначення координат лазерних відображень залежно від масштабу топографічної зйомки та фізико-географічних умов території, однак відсутня пряма регламентація мінімальної очікуваної щільності хмари точок. Це створює необхідність узгодження нормативних вимог до точності з розрахунковими показниками щільності, особливо з урахуванням типу рельєфу та земного покриття.

Додаткової актуальності набуває питання забезпечення достатньої щільності точок класу «Земля» в умовах вегетації, де втрати імпульсів через рослинний покрив можуть суттєво впливати на точність ЦМР. У цьому контексті застосування емпіричної залежності між середньоквадратичною похибкою висот, щільністю точок та нахилом місцевості дозволяє обґрунтувати мінімально необхідні параметри проектування АЛС.

Досягнення нормативної точності забезпечується опосередковано через вибір технічних параметрів польоту без формалізованого зв'язку з очікуваною щільністю відбиттів.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons CC-BY 4.

© Калинич Іван Васильович,  
Ваш Ярослав Іванович,  
Ничвид Марія Романівна, 2026

Таким чином, виникає потреба у встановленні аналітичної залежності між нормативними значеннями середньоквадратичної похибки та мінімальною необхідною щільністю точок. Дослідження взаємозв'язку між нормативними вимогами до точності та мінімальною щільністю хмари точок є необхідним для формування науково обґрунтованих критеріїв планування та проектування АЛС в різних фізико-географічних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попередні дослідження показали, що як наявність густої рослинності [1; 2; 3; 4], так і пересічена місцевість [3; 5; 6; 7; 8; 9], є суттєвими факторами, що створюють проблеми для точності ЦМР, які отримані за допомогою LiDAR та можуть використовуватися як джерело інформації про зелені насадження [10]. Таким чином, у сучасній літературі щільність хмари точок розглядається не ізольовано, а в комплексі з морфометричними та біофізичними характеристиками території.

У статті [11] аналізується вплив дати виконання зйомки, висоти польоту, імпульсного режиму, нахилу місцевості, лісового покриву та варіацій ділянки на точність ЦММ у бореальній лісовій зоні. Згідно з нашим дослідженням, середньоквадратичне відхилення коливалося від  $\pm 0,13$  м до  $\pm 0,18$  м (залежно від щільності лісового пологу – 8–10, 4–5 та 2–3 точки/кв.м), що підтверджує наявність прямої залежності між густотою відбиттів і вертикальною точністю.

За даними [12] та Фінського інституту геопросторових досліджень, покращення щільності точок може поступово зменшувати як помилки висоти, так і помилки планіметричного розтягу: збільшення щільності імпульсів до 10 разів призведе до зменшення помилок на 50%.

У роботі [13] проаналізовано явище відбиття лазерного променя від водних поверхонь, що має значення для оптичного та лазерного дистанційного зондування. Це дослідження демонструє вплив фізичних властивостей підстильної поверхні на формування лідарних сигналів та подальшу інтерпретацію даних.

На додаток до статистичних методів оцінювання точності у роботах [14; 15] запропоновано емпіричні формули для визначення точності висоти ЦМР, отриманих із даних аеролазерного сканування малої площі. У цих залежностях щільність точок та нахил місцевості виступають ключовими змінними, що визначають середньоквадратичну похибку висот.

У чинній редакції специфікації програми U.S. Geological Survey для 3D Elevation Program (3DEP) [16] переглянуто підходи до нормування висотної точності лідарних даних та гармонізовано їх із положеннями стандартів США. У межах цієї системи якість результатів АЛС визначається через сукупність взаємопов'язаних показників: сукупний номінальний інтервал між імпульсами, сукупну номінальну щільність імпульсів та вертикальну точність. Для рівнів QL0–QL1 передбачено сукупний номінальний інтервал між імпульсами  $\leq 0,35$  м та щільність  $\geq 8$  т/м<sup>2</sup> при вертикальній точності (NVA) до 0,05–0,10 м; для QL2 – інтервал  $\leq 0,71$  м і щільність  $\geq 2$  т/м<sup>2</sup> при точності  $\leq 0,10$  м; для QL3 – інтервал  $\leq 1,41$  м і щільність  $\geq 0,5$  т/м<sup>2</sup> при точності  $\leq 0,20$  м.

Мінімально допустимим для державних колекцій визначено рівень QL2, однак у складних умовах рельєфу або земного покриву допускається підвищення проектної щільності імпульсів з метою забезпечення нормативної точності цифрових моделей рельєфу.

Запроваджена градація рівнів якості (QL) передбачає інтегроване оцінювання щільності та точності, а також диференціацію вертикальної точності за типами земного покриву (NVA та VVA). Це свідчить про методологічне узгодження параметрів щільності та похибок у міжнародній практиці.

Відповідно до даних [8], у Японії показник щільності точок визначається залежно від покриву місцевості: для низькорослої рослинності – 10–100 точок/м<sup>2</sup>, для щільної рослинності – 20–200 точок/м<sup>2</sup>. Також наведено нормативи щільності імпульсів у Китаї залежно від масштабу картографічного матеріалу: 1:500  $\geq 16$ ; 1:1000  $\geq 4$ ; 1:2000  $\geq 1$ ; 1:5000  $\geq 1$ ; 1:10 000  $\geq 0,25$  [8]. Таким чином, міжнародний досвід демонструє практику прямої регламентації щільності відповідно до масштабу та умов території.

Рекомендовані стандарти щонайменше втричі точнішого положення контрольних точок, ніж оцінювані ЦМР [17], відображають прагнення до забезпечення достовірності результатів контролю.

У вітчизняній науковій літературі проблематика застосування авіаційного лазерного сканування та формування цифрових моделей рельєфу представлена переважно окремими, фрагментованими дослідженнями, що розкривають специфічні аспекти оброблення лідарних даних, автоматизації виділення окремих елементів, аналізу точності та використання різних платформ знімання, однак не формують цілісної концепції оптимізації параметрів АЛС з урахуванням нормативних вимог до точності.

Так, у дослідженні І. Колба та М. Процика [18] представлено підхід до автоматичного виділення структурних ліній рельєфу з растрових ЦМР, створених на основі АЛС, що сприяє ефективнішому аналізу геоморфологічних структур.

У дослідженні Ю. Буденко та ін. [1] проаналізовані підходи до формування та обробки щільної хмари точок у процесі створення ЦМР за допомогою різних програмних засобів.

У роботі [19] охарактеризовано сучасні безпілотні засоби з лідаром, що розширюють можливості застосування технології та актуалізують питання оптимізації параметрів щільності для різних платформ.

Водночас у національній нормативній базі відсутня пряма регламентація мінімальної щільності хмари точок, що створює розрив між встановленими вимогами до точності та параметрами проектування АЛС.

### Формулювання цілей статті

Метою статті є наукове обґрунтування взаємозв'язку між нормативними вимогами до висотної точності ЦМР та мінімальною необхідною щільністю хмари точок АЛС з урахуванням типу рельєфу та земного покриву.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Проектування АЛС здійснюється на основі технічних характеристик сканувальної системи та нормативних вимог до точності результатів. Відповідно до Порядку [20], основним регламентованим показником якості є середня квадратична похибка визначення координат лазерних відображень, диференційована залежно від масштабу топографічної зйомки та фізико-географічних умов території.

Щільність хмари точок при АЛС визначається через параметри знімання та геометрію сканування і може бути представлена функцією частоти випромінювання імпульсів, швидкості польоту, висоти знімання та кута поля зору сканера. Обчислена щільність є номінальною величиною, що характеризує середню кількість відбиттів на одиницю площі в межах смуги сканування.

Згідно з даними [15], вихідними даними для сканування є територія сканування, щільність лазерних точок та їх висотна точність.

Вимоги до проектування АЛС формуються на основі чинних нормативно-правових документів, галузевих стандартів і технічних регламентів, а також технічних специфікацій та експлуатаційних інструкцій відповідних авіаційних лазерних сканувальних комплексів. Сукупність цих документів визначає параметри планування зйомки, критерії точності, щільності даних і якості кінцевих геопросторових продуктів.

Щільність хмари точок, згідно з [12; 20], обчислюють за формулою:

$$E = \frac{N}{V \times H \times 2 \times \tan^2 \frac{\alpha}{2}} \quad (1)$$

- де N – частота випромінювання імпульсу;  
 E – щільність хмари точок;  
 V – швидкість повітряного судна, з якого виконується авіаційне лазерне сканування;  
 α – кут поля зору АЛС;  
 H – висота виконання АЛС.

Обчислена висота та ширина смуги для виконання АЛС будуть похідними від показника необхідної щільності сканування.

Планування зйомок без будь-якого перекриття є критично важливим, оскільки доводиться зіткнутися з проблемою того, що досліджувані ділянки не повністю охоплюються через крен літака та неправильні прямолінійні лінії польоту. Згідно з рекомендаціями [15], варто використовувати перекриття щонайменше 20%. Для зйомок з високою роздільною здатністю також може застосовуватися перекриття щонайменше 50%, якщо є суттєво важливими високі щільності точок, яких неможливо досягти за допомогою параметрів сканування LiDAR та швидкості руху носія зйомки. У випадку проектування кількарядового сканування території показник щільності для проектування необхідно враховувати як їх суму.

Беручи за основу нормативні вимоги [20], визначено вихідні дані, які впливають на проектування щільності лазерного сканування (рис. 1).

Контроль точності результатів виконується на спеціально створених контрольних полігонах. Координати та висоти контрольних точок визначаються методами геодезичних вимірювань – за допомогою GNSS-зйомки або тахеометричної зйомки з дотриманням вимог до точності, встановлених для топографічних робіт відповідного масштабу.

Кількість контрольних точок на контрольному полігоні згідно з Порядком [20] визначається залежно від щільності хмари точок. За щільності 0,5–3 пл/м<sup>2</sup> рекомендується застосування полігону площею 16 м<sup>2</sup> (форми 4 × 4 м або 2 × 8 м) з розміщенням 25–27 контрольних точок. За щільності 3 пл/м<sup>2</sup> і більше допускається використання полігону площею 4 м<sup>2</sup> (2 × 2 м) з мінімальною кількістю 13 контрольних точок.

Такий підхід до організації контролю, за умови використання достатньої кількості контрольних полігонів, дозволяє забезпечити статистично обґрунтовану оцінку вертикальної точності хмари точок, а також підтвердити відповідність отриманих результатів установленим технічним та нормативним вимогам. Цей підхід до контролю точності в майбутньому варто застосовувати і для контролю щільності хмари точок та окремих її класів, зокрема класу «Земля».

Згідно з Порядком [20], оптимальним для виконання АЛС є період до вегетації, початковий етап вегетаційного періоду або післявегетаційний період рослин. Допускається виконання АЛС під час вегетаційного періоду залежно від цілей проведення, що має бути зазначено в технічному завданні.

Відповідно до Додатку 3 Порядку топографічної зйомки [20], нормативно встановлено гранично допустимі значення середніх квадратичних похибок визначення координат врівноважених точок лазерних відображень, що характеризують плану та висотну точність результатів АЛС. Показники точності диференційовано залежно від масштабу топографічної зйомки та визначено у вигляді максимально допустимих значень похибок на місцевості. Встановлена градація відображає закономірне підвищення вимог до точності просторових даних із переходом до крупніших масштабів, що обумовлено необхідністю забезпечення належної метричної відповідності матеріалів топографічної зйомки їх масштабній деталізації та функціональному призначенню.

Однак номінальна щільність не є тотальною ефективній щільності точок класу «Земля». Остання формується внаслідок класифікації та залежить від проникності лазерного імпульсу крізь рослинний покрив, морфометричної складності рельєфу та кута падіння променя.

Для встановлення функціонального зв'язку між щільністю хмари точок та точністю ЦМР використано емпіричну залежність, запропоновану у роботах [12; 14], у якій середньоквадратична похибка висот визначається як функція щільності точок та тангенса кута нахилу місцевості:

$$\sigma_z [\text{см}] = \pm \left( \frac{6}{\sqrt{n}} + 50 \tan \alpha \right), \quad (2)$$

де n (точки/кв.м) позначає щільність точок, а tan(α) – нахил місцевості.

Зазначена залежність дозволяє перейти від емпіричного опису якості до прогнозного визначення мінімально необхідної щільності:

$$n = \frac{36}{(\sigma_z - 50 \tan \alpha)^2} \quad (3)$$

Підставлення нормативних значень середніх квадратичних похибок дало змогу визначити мінімальні розрахункові значення щільності точок класу «Земля» для різних масштабів топографічної зйомки, які наведено в таблиці 1. Отримані результати засвідчили закономірне зростання мінімальної щільності із підвищенням вимог до точності. Таким чином, доведено, що нормативна точність може бути формалізовано трансформована у кількісні вимоги до щільності хмари



Рис. 1. Залежність щільності точок від проектувальних елементів

Джерело: сформовано авторами на основі [20]

Таблиця 1. Залежність висотної точності та мінімальної щільності хмари точок класу «Земля»

№ з/п	Масштаб зйомки	Точність точок лазерних відображень на місцевості, м	Щільність точок лазерних відображень класу «Земля»	
			Рівнинні поверхні без рослинного покриву	Рівнинні поверхні з лісовим покривом
1	1:5000	≤ 0,12	> 0,25	1
2	1:2000	≤ 0,10	> 0,36	2
3	1:1000	≤ 0,10	> 0,36	3
4	1:500	≤ 0,05	> 1,44	4

точок та потребує подальшого регулювання в частині приведення до міжнародних норм, стандартів та залежності від умов території.

Особливої уваги потребує вплив рослинного покриву. Згідно з даними [21], втрати імпульсів у лісистій місцевості можуть становити не менше 25%, що безпосередньо зменшує фактичну щільність наземних відбиттів. У період активної вегетації цей ефект посилюється.

Крім того, зі зростанням крутизни схилів збільшується вплив геометричних похибок інтерполяції, що додатково підвищує вимоги до густоти точок у гірських районах.

Отже, проектна номінальна щільність повинна враховувати коефіцієнт зменшення ефективної густоти точок класу «Земля». Ігнорування цього чинника призводить до невідповідності між запланованою та реально досягнутою точністю ЦМР. Оскільки формула Карела та Крауса [14] безпосередньо пов'язана з нею, визначимо мінімальну щільність точок АЛС на основі середніх квадратичних похибок висот ЦМР.

Отже, принцип диференціації реалізовано і в національній нормативній базі України у сфері топографо-геодезичних робіт. Встановлені вимоги до середніх квадратичних похибок висот ЦМР враховують як масштаб топографічного плану, так і фізико-географічні умови території – тип рельєфу (поскорівнинний, рівнинний, пересічений, горбистий, низькогірний, середньогірний, високогірний) та наявність лісового покриву. Зі зростанням складності морфометричної структури рельєфу та за умов залісеності нормативні значення допустимих похибок закономірно збільшуються, що відображає об'єктивний вплив крутизни схилів, дискретності форм рельєфу та екранувального ефекту рослинності на точність визначення висот.

Таким чином, як міжнародні, так і національні нормативні підходи ґрунтуються на спільному методологічному принципі – адаптації критеріїв вертикальної точності до умов земного покриву та морфології місцевості. Це забезпечує узгодженість процедур контролю якості лідарних даних і ЦМР з реальними фізико-географічними факторами, що визначають рівень досяжної метричної достовірності просторової інформації.

Із зазначеного вище можна сформулювати необхідність подальших досліджень в частині узгодження нормативної щільності залежно від типу рельєфу і земного покриву та конкретизувати вимоги щодо мінімальної очікуваної щільності точок залежно від району робіт та нормативно класифікувати їх за прикладом вимог до ЦМР.

#### Висновки та перспективи подальших розвідок

Аналіз міжнародних та національних нормативних підходів засвідчив, що щільність хмари точок та вертикальна точність є взаємопов'язаними параметрами якості результатів АЛС. У міжнародній практиці вони інтегруються в єдину систему класифікації рівнів якості, тоді як у національній нормативній базі регламентуються переважно через допустимі похибки. Встановлено, що емпіричні залежності між середньоквадратичною похибкою висот, щільністю точок та крутизною схилів дозволяють визначати мінімально необхідну щільність хмари точок для забезпечення заданої точності ЦМР. Це вказує на перспективу переходу від формального нормування точності до розрахунково обґрунтованого проектування параметрів АЛС. Отримані розрахункові значення мінімальної щільності точок для різних масштабів топографічної зйомки та типів рельєфу демонструють закономірне зростання вимог із підвищенням детальності масштабу та ускладненням морфометричних умов території та потребують подальшого удосконалень. В умовах залісеності та під час виконання робіт у вегетаційний період необхідне коригування проектної щільності з урахуванням втрат імпульсів, що безпосередньо впливають на щільність точок класу «Земля» та якість побудови ЦМР. Визначено щільність хмари точок АЛС класу «Земля» на основі вимог середніх квадратичних похибок висот ЦМР з урахуванням типу місцевості (поскорівнинні, рівнинні, пересічені та горбисті, низькогірні, середньогірні та високогірні райони) за залісеності.

Обґрунтовано доцільність нормативного закріплення мінімальної очікуваної щільності хмари точок залежно від типу рельєфу та земного покриву за аналогією з існуючою системою диференціації вимог до точності ЦМР.

Подальші дослідження передовсім будуть продовжені в напрямі визначення залежностей відношень класу «Земля» до загальної кількості хмари точок в різних умовах.

#### Література

1. Butenko Y., Kutsenko O., Tertysna O., Tkachuk Y., Yaretska K. Формування щільної хмари точок та її опрацювання при створенні цифрової моделі рельєфу. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2024. Випуск 3. С. 109-122. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2024.03.09>.
2. Bater C.W., Coops N.C. Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. *Comput. Geosci.* 2009. Vol. 35. P. 289-300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.09.001>.
3. Hodgson M.E., Bresnahan P. Accuracy of airborne LiDAR-derived elevation. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2004. Vol. 70. P. 331-339. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.70.3.331>.
4. Vash Y., Nychvyd M., Kalynych I., Kablak N. The Influence of Surface Type on the Accuracy of Digital Terrain Models Derived from Airborne Laser Scanning Data (Using LiAir V70 as a Case Study). *In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»*. 2025. Vol. 2025 No. 1. P. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552041>.
5. Stereńczak K., Ciesielski M., Balazy R., Zawila-Niedzwiecki T. Comparison of various algorithms for DTM interpolation from LIDAR data in dense mountain forests. *Eur. J. Remote Sens.* 2016. Vol. 49. P. 599-621. DOI: <https://doi.org/10.5721/EuJRS20164932>.
6. Stereńczak K., Moskalik T. Use of LIDAR-based digital terrain model and single tree segmentation data for optimal forest skid trail network. *iForest-Biogeosci.* 2014. Vol. 8. P. 661. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor1355-007>.
7. Aguilar F.J., Agüera F., Aguilar M.A., Carvajal F. Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid DEM accuracy. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2005. Vol. 71. P. 805-816. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.71.7.805>.

8. Liao Z., Dong X., He Q. Calculating the optimal point cloud density for airborne lidar landslide investigation: An adaptive approach. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16(23). P. 4563.
9. Agüera-Vega F., Agüera-Puntas M., Martínez-Carricondo P., Mancini F., Carvajal F. Effects of point cloud density, interpolation method and grid size on derived Digital Terrain Model accuracy at micro topography level. *International Journal of Remote Sensing*. 2020. Vol. 41(21). P. 8281-8299.
10. Vash Y. Features of inventory of green plantings by automated terrestrial laser scanning methods. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2023. Випуск 98. С. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.024>.
11. Huuppa H., Yu X., Huuppa J., Kaartinen H., Kaasalainen S., Honkavaara E., Rönnholm P. Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2005. № 36(3/W19). P. 85-90. URL: <https://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W19/papers/085.pdf>.
12. Shan J., Toth C.K. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC Press. 2018. 655 p.
13. Бурштинська Х. В., Бабушка А. В. Вплив атмосфери на послаблення лазерного променя при скануванні місцевості. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2013. Випуск 78. С. 49-53. URL: <https://science.lpnu.ua/uk/istcgcap/vsi-vypusky/vypusk-78-2013/vplyv-atmosfery-na-poslablennya-lazernogo-promenya-pry>.
14. Karel W., Kraus K. Quality parameters of digital terrain models. *European Spatial Data Research*. 2006. P.125-139 URL: [https://www.eurosd.net/sites/default/files/uploaded\\_files/eurosd\\_publication\\_ndeg\\_51.pdf](https://www.eurosd.net/sites/default/files/uploaded_files/eurosd_publication_ndeg_51.pdf).
15. Vosselman G., Maas H.G. *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles publishing. 2010. 342 p.
16. U.S. Geological Survey. Lidar Base Specification 2025 rev. A: U.S. Department of the Interior JUN 2025. URL: <https://www.usgs.gov/media/files/lidar-base-specification-2025-rev-a>.
17. Höhle J., Höhle M. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2009. Vol. 64. P. 398–406. URL: <https://scispace.com/pdf/accuracy-assessment-of-digital-elevation-models-by-means-of-4kw43oeqtz.pdf>.
18. Колб І., Процик М. Методика автоматичного виділення структурних ліній рельєфу з растрових ЦМР, створених за даними лазерного сканування. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2009. № 72. С. 69–74. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/may/1634/gka72200911.pdf>.
19. Глотов В., Петришин І. Аналіз сучасних безпілотних літальних апаратів, оснащених системою лазерного сканування. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2023. Випуск 1 (45). С. 59-65. DOI: <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-45-59-65>.
20. Про затвердження Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500»: Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України № 1675 від 17 квітня 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0868-25#Text>.
21. Бабушка А.В., Бурштинська Х.В. *Авіаційне лазерне сканування: навчальний посібник*. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2019. 116 с.

## References

1. Butenko, Y., Kutsenko, O., Tertyshna, O., Tkachuk, Y., Yaretska, K. (2024). «Formation of a dense point cloud and its processing when creating a digital terrain model». *Zemleustrija, kadastr i monitoringh zemel'*. Issue 3. pp. 109-122. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustrija2024.03.09>.
2. Bater, C.W., Coops, N.C. (2009). «Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation». *Comput. Geosci*. Vol. 35. pp. 289–300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.09.001>.
3. Hodgson, M.E., Bresnahan, P. (2004). «Accuracy of airborne LiDAR-derived elevation». *Photogramm. Eng. Remote Sens.* Vol. 70. pp. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.70.3.331>.
4. Vash, Y., Nychvyd, M., Kalynych, I., Kablak, N. (2025). «The Influence of Surface Type on the Accuracy of Digital Terrain Models Derived from Airborne Laser Scanning Data (Using LiAir V70 as a Case Study)». *In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»*. Vol. 2025 No. 1. pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552041>.
5. Stereńczak, K., Ciesielski, M., Balazy, R., Zawila-Niedzwiecki, T. (2016). «Comparison of various algorithms for DTM interpolation from LIDAR data in dense mountain forests». *Eur. J. Remote Sens.* Vol. 49. pp. 599–621. DOI: <https://doi.org/10.5721/EuJRS20164932>.
6. Stereńczak, K., Moskalik, T. (2014). «Use of LIDAR-based digital terrain model and single tree segmentation data for optimal forest skid trail network». *iForest-BiogeoSci*. Vol. 8. P. 661. DOI: <https://doi.org/10.3832/IFOR1355-007>.
7. Aguilar, F.J., Agüera, F., Aguilar, M.A., Carvajal, F. (2005). «Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid DEM accuracy». *Photogramm. Eng. Remote Sens.* Vol. 71. pp. 805–816. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.71.7.805>.
8. Liao, Z., Dong, X., He, Q. (2024). «Calculating the optimal point cloud density for airborne lidar landslide investigation: An adaptive approach». *Remote Sensing*. Vol. 16(23). pp. 4563.
9. Agüera-Vega, F., Agüera-Puntas, M., Martínez-Carricondo, P., Mancini, F., Carvajal, F. (2020). «Effects of point cloud density, interpolation method and grid size on derived Digital Terrain Model accuracy at micro topography level». *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 41(21). pp. 8281-8299.
10. Vash, Y. (2023). «Features of inventory of green plantings by automated terrestrial laser scanning methods». *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznmannia*. Issue 98. pp. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.024>.
11. Huuppa, H., Yu, X., Huuppa, J., Kaartinen, H., Kaasalainen, S., Honkavaara, E., Rönnholm, P. (2005). «Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas». *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. № 36(3/W19). pp. 85-90. Available at: <https://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W19/papers/085.pdf>.
12. Shan, J., Toth, C.K. (2018). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC Press.
13. Burshtyn's'ka, Kh. V., Babushka, A.V. (2013). «Influence of the atmosphere on the attenuation of the laser beam during terrain scanning. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznmannia*. Issue 78. pp. 49-53. Available at: <https://science.lpnu.ua/uk/istcgcap/vsi-vypusky/vypusk-78-2013/vplyv-atmosfery-na-poslablennya-lazernogo-promenya-pry>.
14. Karel, W., Kraus, K. (2006). «Quality parameters of digital terrain models». *European Spatial Data Research*. pp. 125-139 Available at: [https://www.eurosd.net/sites/default/files/uploaded\\_files/eurosd\\_publication\\_ndeg\\_51.pdf](https://www.eurosd.net/sites/default/files/uploaded_files/eurosd_publication_ndeg_51.pdf).
15. Vosselman, G., Maas, H.G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles publishing.
16. U.S. Geological Survey. Lidar Base Specification 2025 rev. A: U.S. Department of the Interior JUN 2025. Available at: <https://www.usgs.gov/media/files/lidar-base-specification-2025-rev-a>.
17. Höhle, J., Höhle, M. (2009). «Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods». *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* Vol. 64. pp. 398–406. Available at: <https://scispace.com/pdf/accuracy-assessment-of-digital-elevation-models-by-means-of-4kw43oeqtz.pdf>.
18. Kolb, I., Protsyk, M. (2009). «Methodology for automatic extraction of structural relief lines from raster DEMs created from laser scanning data». *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznmannia*. № 72. pp. 69–74. Available at: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/may/1634/gka72200911.pdf>.
19. Hlotov, V., Petryshyn, I. (2023). «Analysis of modern unmanned aerial vehicles equipped with a laser scanning system». *Suchasni dosiahnennia heodezichnoi nauky ta vyrobnytstva*. Issue 1 (45). pp. 59-65. DOI: <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-45-59-65>.
20. Pro zatverdzhennia Porядku topografichnoi zjomyk u masshtabakh 1:5000, 1:2000, 1:1000 ta 1:500»: Nakaz Ministerstva ahrranoi polityky ta prodovol'stva Ukrainy. (2025). [On approval of the Procedure for topographic surveying at scales 1:5000, 1:2000, 1:1000 and 1:500". Order of the Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine]. № 1675 dated April 17, 2025. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0868-25#Text>.
21. Babushka, A.V., Burshtyn's'ka, Kh.V. (2019). *Aviatsijne lazerne skanuvannia*. [Aviation laser scanning]. Vydavnytstvo L'viv's'koi politekhniki. L'viv. Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.01.2026  
Опубліковано / Published 25.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 08.02.2026