

ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАЗЕМНОГО 3D-СКАНУВАННЯ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ

Батракова А. Г., Шелкова І. С., Дорожко Є. В.,
Урдзік С. М., Бессарабов О. О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** У статті розглянуто особливості камерального оброблення результатів наземного лазерного 3D-сканування мостового переходу протяжністю 198,75 м. Обґрунтовано послідовність реєстрації хмар точок за геодезичними марками та автоматичного зшивання методом «cloud-to-cloud». Сформульовано практичні рекомендації щодо організації польових робіт.*

***Ключові слова:** наземне лазерне сканування, реєстрація хмари точок, мостовий перехід, Trimble Business Center, геодезичні марки, багатостанційне сканування.*

Вступ

Наземне лазерне 3D-сканування (НЛС) широко застосовується для обстеження інженерних споруд, зокрема мостів, оскільки забезпечує швидке отримання великого обсягу просторових даних із високою точністю [1]. Отримана інформація формується у вигляді хмари точок, що дозволяє створювати детальні тривимірні моделі об'єктів та здійснювати аналіз їхніх геометричних параметрів і можливих деформацій.

Процес подальшого оброблення містить реєстрацію окремих сканів, очищення інформації від шумів і побудову цифрової моделі об'єкта [2]. Використання таких моделей сприяє підвищенню рівня точності обстеження інженерних конструкцій та ефективності їх моніторингу.

Мостові переходи є важливими елементами транспортної інфраструктури, технічний стан яких безпосередньо впливає на безпеку руху та надійність дорожньої мережі. Лінійний тип таких споруд із протяжністю від кількох десятків до кількох сотень метрів зумовлює необхідність здійснення багатостанційного сканування з послідовним переміщенням приладу вздовж об'єкта. Це також висуває специфічні вимоги до організації камерального оброблення: забезпечення геометричної зв'язності великої кількості окремих хмар точок, мінімізація накопиченої похибки реєстрації вздовж всієї довжини об'єкта, а також усунення перешкод, що виникають через активний транспортний рух під час проведення польових робіт.

В умовах повоєнного відновлення України питання оперативного та точного документування стану мостових конструкцій набуває особливої актуальності. Цифрові моделі, отримані засобами НЛС, можуть бути осно-

вою як для першочергового аналізу пошкоджень, так і для довгострокового моніторингу деформацій і планування ремонтно-відновлювальних робіт.

Незважаючи на широке застосування технології НЛС для обстеження інженерних споруд, практичні аспекти камерального оброблення результатів багатостанційного сканування лінійних мостових об'єктів недостатньо висвітлені в науковій літературі.

Аналіз публікацій

У роботі [3] досліджено застосування алгоритмів реєстрації хмар точок на основі методу ICP (Iterative Closest Point) під час оброблення інформації наземного лазерного сканування довгопрогонових мостів. Визначено, що для споруд великої протяжності виникають труднощі через значну дальність сканування та малі кути падіння лазерного променя, що ускладнює процес суміщення сканів.

У дослідженні [4] запропоновано ієрархічний метод багаторакурсної реєстрації хмар точок мостових конструкцій на основі шаблонного керування без використання маркерів. Цей підхід дозволяє автоматично визначати зони перекриття між неупорядкованими сканами та збільшує рівень ефективності оброблення інформації на відміну від традиційного попарного зшивання.

У роботі [5] наведено каскадний підхід до реєстрації хмар точок елементів сталевих аркових конструкцій, що поєднує грубе суміщення на основі локальних геометричних ознак та уточнення за допомогою алгоритму Coherent Point Drift. Запропонований метод забезпечує субсантиметрову точність реєстрації, що доводить ефективність автоматизованих підходів під час оброблення інфор-

мації лазерного сканування складних інженерних споруд.

В оглядовій роботі [6] узагальнено сучасні підходи до використання технологій 3D-хмар точок у системах моніторингу технічного стану інженерних об'єктів. Визначено основні методи оброблення інформації, зокрема геометрично-морфологічний, різницевий аналіз у часі, витягнення ознак, а також методи машинного та глибокого навчання, що демонструють високу ефективність для аналізу стану мостових та інших інженерних споруд.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є аналіз особливостей камерального оброблення результатів наземного лазерного 3D-сканування мостового переходу протяжністю 198,75 м із використанням програмного забезпечення Trimble Business Center, зокрема поетапної ручної реєстрації хмар точок за геодезичними марками та фінального автоматичного зшивання двох частин моделі.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- обґрунтувати раціональну послідовність імпорту та оброблення польових даних з урахуванням значного обсягу інформації;

- здійснити ручну реєстрацію хмар точок за опорними марками для кожного боку мостового переходу методом послідовного «ланцюгового» зшивання;

- дослідити вплив умов освітлення під час польових робіт на точність і трудомісткість ідентифікації опорних марок;

- здійснити автоматичну реєстрацію двох частин методом «cloud-to-cloud» для формування єдиної просторової моделі;

- сформулювати практичні рекомендації щодо умов проведення польових робіт для підвищення якості подальшого оброблення.

Характеристика об'єкта дослідження

Об'єктом наземного лазерного 3D-сканування вибрано мостовий перехід крізь річку Харків, розташований на автомобільній дорозі державного значення М-03 Київ – Харків – Довжанський на км 499+798 (Харківська область) [7]. Споруда введена в експлуатацію 1968 року та спроектована під навантаження Н-30, НК-80 [8, 9]. Загальна довжина мосту становить 198,75 м, геометрична схема – $6 \times 33,00$ м, статична схема – балкова розрізна.

З урахуванням значного віку споруди, її стратегічного розташування на дорозі державного значення та лінійної протяжності

198,75 м мостовий перехід належить до об'єктів, для яких застосування методу наземного лазерного сканування є найбільш доцільним. Останнє обстеження споруди було здійснено 2006 року з визначенням загального стану як «працездатна» [10], що додатково обумовлює актуальність сучасного цифрового документування її геометричних параметрів і поточного технічного стану (рис. 1).



Рис. 1. Вид на мостовий перехід

Імпорт та первинне оброблення польових даних

На початковому етапі камерального опрацювання здійснюється перенесення результатів польового сканування до програмного комплексу Trimble Business Center. Інформація, отримана за допомогою лазерного сканера Trimble TX6, зберігається у файлах формату «.tzw», який є спеціалізованим форматом компанії Trimble. Він поєднує просторову інформацію хмари точок із супровідною службовою, зокрема з координатами розташування станції, часовими характеристиками процесу зйомки, параметрами режиму сканування, показниками щільності точок, а також кольоровими даними, отриманими з інтегрованої камери.

Завантаження матеріалів здійснюється за допомогою інструментів імпорту, передбачених у програмному середовищі. Після вибору типу файлів система автоматично здійснює розпізнавання структури даних і формує тривимірне положення сканувальних станцій. Кожен окремих скан ідентифікується як самостійний елемент проекту, що забезпечує зручність подальшої роботи з інформацією.

З огляду на значний обсяг отриманої інформації (17 станцій для кожної частини мостового переходу) оброблення здійснюється поетапно (рис. 2). Одночасне завантаження повного масиву може призвести до перевантаження системи та зниження ефективності роботи. Через це доцільним є поділ інформації на окремі частини з їх подальшим опрацюванням у різних проектах. Такий підхід дозволяє оптимізувати використання обчислювальних ресурсів

і підвищує точність контролю якості реєстрації для кожної ділянки об'єкта.

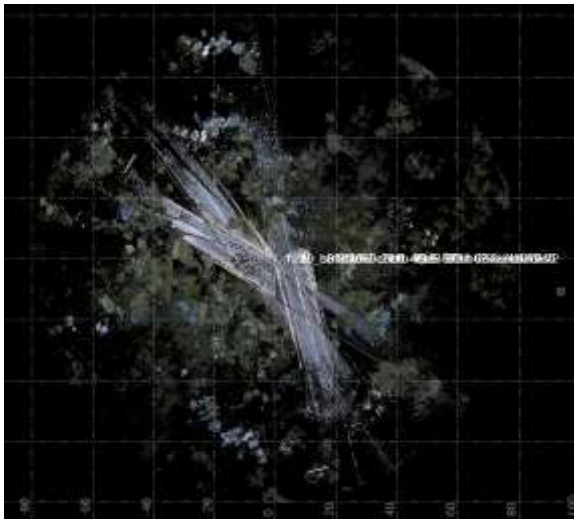


Рис. 2. Поетапний імпорт даних сканування

Ручна реєстрація хмар точок за опорними марками

Реєстрація (зшивання) окремих хмар точок, отриманих із різних станцій, є необхідною умовою формування цілісної просторової моделі об'єкта. В умовах оброблення інформації наземного лазерного 3D-сканування лінійного об'єкта з інтенсивним рухом транспорту автоматичні алгоритми є неефективними, тому було застосовано ручний підхід із використанням опорних точок.

Технологія ручної реєстрації у Trimble Business Center ґрунтується на ідентифікації спільних точок у хмарах від суміжних станцій. Оператор послідовно визначає опорні точки в зоні перекриття сканів, після чого програмне забезпечення обчислює параметри просторового перетворення, необхідні для їх коректного суміщення (рис. 3).

Для реєстрації кожної пари суміжних станцій використовувались три опорні точки – максимальна кількість, яку підтримує режим ручного зшивання в програмі. Вибір саме трьох точок обумовлений математичною необхідністю: три точки однозначно визначають площину, що є достатнім для обчислення всіх шести параметрів просторової трансформації без перевизначення системи рівнянь.

Як опорні точки застосовувались геодезичні марки, які найкраще видно на сканах в обох хмарах. Їх розміщено по обидва боки проїзної частини (рис. 4, рис. 5), що створило сприятливі умови для визначення просторового положення та підвищило надійність реєстрації (зшивання).

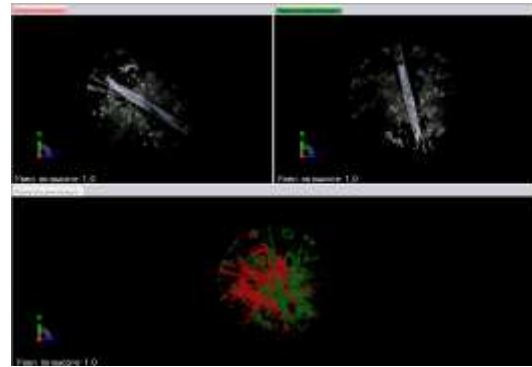


Рис. 3. Вікно ручної реєстрації



Рис. 4. Марка 1-го та 2-го типів



Рис. 5. Марки 3-го типу

Процес оброблення здійснювався послідовно з використанням методу «ланцюга», відповідно до якого кожна наступна станція приєднувалась до вже зареєстрованої. Такий підхід забезпечує поступове формування єдиної хмари точок уздовж усього об'єкта (рис. 6).

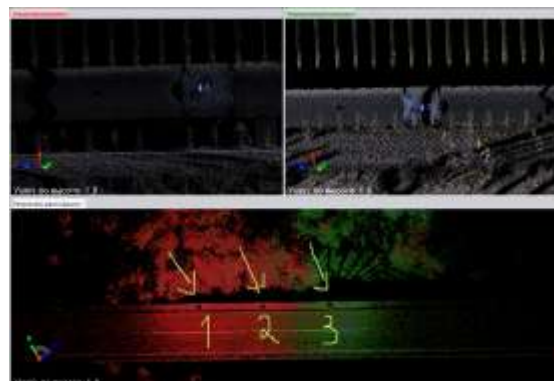


Рис. 6. Послідовне зшивання станцій

Якість реєстрації контролювалась через показник відсотка перекриття між хмарами: низьке його значення може свідчити про недостатню зону спільної видимості або помилки у виборі опорних точок.

Після завершення процесу оброблення першого боку аналогічна процедура здійснювалась для другого боку мостового переходу в новому проекті Trimble Business Center.

Вплив умов освітлення на точність ідентифікації марок

На якість камерального оброблення суттєво вплинули умови освітлення під час здійснення польових робіт. Зйомка проводилась у сонячну погоду, що спричинило нерівномірний розподіл освітлення на поверхні об'єкта. Пряме сонячне проміння створило зони з високою яскравістю на одних ділянках і глибокі тіні на інших (рис. 7).



Рис. 7. Вплив сонячного освітлення на колоризацію хмари точок

Вбудована камера сканера Trimble TX6 має обмежений динамічний діапазон, що ускладнює одночасне коректне відображення як яскраво освітлених, так і затінених ділянок. Через це кольорова інформація хмари точок частково втратила контрастність і насиченість, що призвело до зниження виразності зображення та наближення його до монохромного вигляду.

Це негативно вплинуло на процес візуальної ідентифікації опорних марок: контрастне шахматне забарвлення стало менш виразним, отже, доводилось витратити додатковий час на точне позиціонування курсору в центрі марки, керуючись переважно геометричною формою об'єкта, а не її кольоровими характеристиками (рис. 8).

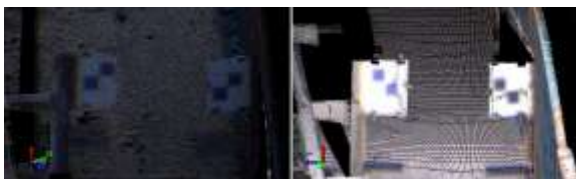


Рис. 8. Різниця видимості марок через контрастне освітлення

Це підвищило рівень трудомісткості етапу реєстрації та збільшило ризик похибок під час визначення опорних точок.

Автоматична реєстрація двох частин методом «cloud-to-cloud»

Фінальним етапом формування єдиної хмари точок мостового переходу стало об'єднання двох незалежно зареєстрованих частин (рис. 9). Для реалізації цього завдання використано автоматичний метод реєстрації «cloud-to-cloud», що ґрунтується на алгоритмах геометричного порівняння хмар точок без необхідності ручного вказування опорних елементів.



Рис. 9. Зшита модель мостового переходу

Ефективність такого підходу визначається наявністю ділянок перекриття, у межах яких наявні однакові елементи об'єкта. У цьому випадку до них належать поверхня проїзної частини, елементи огороження та інші конструктивні складові мосту, що були зафіксовані під час сканування з різних позицій. На основі аналізу цих елементів програмний алгоритм здійснює пошук відповідностей між хмарами та визначає параметри їх взаєморозташування в просторі.

На відміну від ручної реєстрації, де використовуються окремі опорні точки, метод «cloud-to-cloud» передбачає одночасне оброблення значної кількості точок у зоні перекриття. Це дозволяє зменшити вплив випадкових похибок і забезпечити більш стабільний результат завдяки статистичному узагальненню інформації.

Після автоматичної реєстрації здійснюється аналіз її якості на основі відповідних показників. До них належать середньоквадратичне відхилення взаєморозташування хмар точок, рівень їх перекриття, а також кількість точок, використаних у процесі обчислень. Ці параметри дозволяють оцінити надійність результату та за необхідності скоригувати налаштування алгоритму для повторної реєстрації.

Висновки

На основі досвіду камерального оброблення сформульовано практичні рекомендації щодо організації польових робіт з метою

підвищення якості подальшого процесу:

– здійснення процесу сканування за рівномірної хмарності в ранковій чи вечірній час забезпечує дифузне освітлення об'єкта, що суттєво підвищує якість колоризації хмари точок та спрощує подальшу візуальну ідентифікацію опорних марок;

– просторовий розподіл геодезичних марок у різних азимутальних напрямках щодо позиції сканера, зокрема з обох боків проїзної частини, є обов'язковою умовою геометрично надійного зшивання хмар точок лінійних споруд;

– крок між станціями 10–12 м за декларованої оптимальної дальності сканування 30 м забезпечує достатнє резервування опорних марок у полі зору кожної позиції, що є обов'язковим під час сканування в умовах активного транспортного руху;

– роздільне оброблення окремих частин лінійного об'єкта з подальшим автоматичним об'єднанням є більш ефективною стратегією, як порівняти зі спробою одночасної реєстрації всього масиву інформації.

Література

1. Особливості технології на-земного лазерного 3D-сканування для аналізу стану дорожнього покриття / А. Г. Батракова та ін. Вісник ХНАДУ. 2024. Вип. 107. С. 124–129. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.124>
2. Етапи оброблення показників наземного лазерного 3D-сканування дорожнього покриття з використанням Trimble RealWorks / А. Г. Батракова та ін. Вісник ХНАДУ. 2025. Вип. 109. С. 134–138. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.134>
3. Zhang H. et al. Point Cloud Registration Methods for Long-Span Bridge Spatial Deformation Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning. *Structural Control and Health Monitoring*. 2023. Vol. 2023. Art. ID 2629418. 16 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/2629418>
4. Xiong G. et al. Template-Guided Hierarchical Multi-View Registration Framework of Unordered Bridge Terrestrial Laser Scanning Data. *Sensors*. 2024. Vol. 24. № 5. Art. 1394. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24051394>
5. Lv Y. et al. A Point Cloud Registration Method for Steel Tubular Arch Rib Segments of CFST Arch Bridges Based on Local Geometric Constraints. *Buildings*. 2025. Vol. 15. № 12. Art. 2130. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15122130>
6. Zhang Y., Nie G., Wang D. Structural health monitoring based on three-dimensional point cloud technology: A systematic review. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. Art. 106552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106552>
7. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. Чинний від 01.04.2016. Київ: Мінрегіонбуд України, 2015. 91 с.
8. ДБН В.2.3-6:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження та випробування. Чинний від 01.03.2010. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009.
9. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Навантаження та впливи. Мости та труби. Чинний від 01.03.2010. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 70 с.
10. ДСТУ 9181:2022. Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Чинний від 01.01.2023. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 32 с.

References

1. Batrakova, A. H., Shelkova, I. S., Dorozhko, Ye. V., Sarkisian, H. S., & Urdzik, S. M. (2024). Osoblyvosti tekhnolohii nazemnoho lazernoho 3D-skanuvannia dlia analizu stanu dorozhnoho pokryvu [Features of terrestrial laser 3D scanning technology for road surface condition analysis]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, (107), 124–129. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.124>
2. Batrakova, A. H., Shelkova, I. S., Dorozhko, Ye. V., Sarkisian, H. S., & Urdzik, S. M. (2025). Etagy obrobлення pokaznykiv nazemnoho lazernoho 3D-skanuvannia dorozhnoho pokryvu z vykorystanniam Trimble RealWorks [Stages of processing terrestrial laser 3D scanning data of road pavement using Trimble RealWorks]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, (109), 134–138. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.134>
3. Zhang, H., et al. (2023). Point cloud registration methods for long-span bridge spatial deformation monitoring using terrestrial laser scanning. *Structural Control and Health Monitoring*, 2023, Article 2629418, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2023/2629418>
4. Xiong, G., et al. (2024). Template-guided hierarchical multi-view registration framework of unordered bridge terrestrial laser scanning data. *Sensors*, 24(5), Article 1394. <https://doi.org/10.3390/s24051394>
5. Lv, Y., et al. (2025). A point cloud registration method for steel tubular arch rib segments of CFST arch bridges based on local geometric constraints. *Buildings*, 15(12), Article 2130. <https://doi.org/10.3390/buildings15122130>
6. Zhang, Y., Nie, G., & Wang, D. (2025). Structural health monitoring based on three-dimensional point cloud technology: A systematic review. *Results in Engineering*, 27, Article 106552. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106552>
7. Ministry of Regional Development of Ukraine. (2015). DBN V.2.3-4:2015. Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo. Highways. Part I. Design. Part II. Construction. Kyiv: Minrehion Ukrainy.
8. Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine. (2009). DBN V.2.3-6:2009. Sporydy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia ta vyprobuvannia. Transport structures. Bridges and culverts. Inspection and testing. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy.
9. Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine. (2009). DBN V.1.2-15:2009.

Sporudy transportu. Navantazhennia ta vplyvy. Mosty ta truby. Transport structures. Loads and impacts. Bridges and culverts. Kyiv: Minrehi-onbud Ukrainy.

10. DP «UkrNDNTs» (2022). DSTU 9181:2022. Nastanova z otsiniuvannia ta prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv. Guidelines for evaluation and forecasting of the technical condition of road bridges. Kyiv.

Батракова Анжеліка Геннадіївна, д.т.н., проф. каф. проєктування доріг, геодезії і землеустрою, agbatr@ukr.net, тел. +38 050-323-13-78,

Шелкова Ірина Сергіївна, асист. каф. проєктування доріг, геодезії і землеустрою, irinagunko98@gmail.com, +38 099-481-32-19,

Дорошко Євген Вікторович, к.т.н., доц. каф. проєктування доріг, геодезії і землеустрою, evgeniy.dorozhko@gmail.com, +38 068-069-97-22,

Урдзік Сергій Миколайович, к.т.н., доц. каф. проєктування доріг, геодезії і землеустрою, urdzick@gmail.com, +38 067-593-50-92,

Бессарабов Олексій Олександрович, асист. каф. проєктування доріг, геодезії і землеустрою, bessarabovaleksej3@gmail.com, +380995049811,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна.

Features of Processing the Results of Terrestrial 3D Scanning of a Bridge Crossing

Abstract. Problem. Terrestrial laser scanning (TLS) is widely used for bridge inspection due to its ability to rapidly acquire large volumes of spatial data. The linear character of bridge structures necessitates multi-station scanning, which imposes specific requirements on office processing: ensuring geometric consistency of numerous individual point clouds and minimizing accumulated registration error. Practical aspects of multi-station point cloud processing for linear bridge structures under specific field constraints remain insufficiently addressed in domestic literature. **Goal.** To analyse the specific features of office processing of TLS results for a bridge crossing 198,75 m in length using Trimble Business Center, including sequential manual point cloud registration by geodetic targets and final automatic merging of two independently processed model parts. **Methodology.** Field data were acquired using a Trimble TX6 scanner in Level 2 mode from 17 stations per side, with a station interval of 10–12 m. Three types of flat geodetic targets were distributed on both sides of the carriageway. Office processing included sequential chain-based manual registration using three reference points per station pair, followed by automatic cloud-to-cloud registration to merge both halves.

Results. A rational staged import workflow was established for large-volume TLS datasets. Manual chain-based registration ensured acceptable alignment accuracy along the full bridge length. Scanning under direct sunlight was found to significantly reduce colourisation quality and increase labour intensity of target identification. Automatic cloud-to-cloud registration successfully merged both parts into a single spatial model. **Originality.** The study identifies the specific challenges of multi-station TLS processing for linear bridge structures under active traffic and demonstrates the effectiveness of combining manual marker-based registration with automatic cloud-to-cloud merging. **Practical Value.** Practical recommendations are formulated: scanning should be performed under overcast conditions or during morning and evening hours; targets must be distributed on both sides of the carriageway; a station interval of 10–12 m ensures sufficient target redundancy; staged processing with subsequent automatic merging is more efficient than simultaneous registration of the entire dataset.

Key words: terrestrial laser scanning, point cloud registration, bridge crossing, Trimble Business Center, geodetic targets, multi-station scanning.

Batrakova Angelika, Professor, Doct. of Science, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4067-4371>, agbatr@ukr.net,

Shelkova Iryna, assistant, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2562-2175>, irinagunko98@gmail.com,

Dorozhko Yevhen, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2894-2131>, evgeniy.dorozhko@gmail.com,

Urdzik Serhii, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6914-1221>, urdzick@gmail.com

Bessarabov Oleksiy, assistant, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2784-4680>, bessarabovaleksej3@gmail.com,

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received: 05.01.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted: 14.01.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.