

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗЕМЛЯНИХ РОБІТ НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ ВІМ- ТА ГІС-ВИШУКУВАНЬ У ПРОЄКТУВАННІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Попов В. О., Бондар А. В., Максименко М. А., Постолатій М. О.
Вінницький національний технічний університет

***Анотація.** У статті розглянуто сучасний підхід до розв'язання завдання оптимізації земляних робіт у процесі проєктування автомобільних доріг способом інтеграції технологій інформаційного моделювання будівель (ВІМ) та геоінформаційних систем (ГІС), що використовуються на стадії інженерних вишукувань. Обґрунтовано доцільність поєднання високоточної цифрової моделі рельєфу, отриманої на основі ГІС-даних (ЦМР, матеріали дистанційного зондування, інженерно-геологічні та гідрологічні показники), з параметричними ВІМ-моделями автомобільних доріг. Результати дослідження можуть бути впроваджені в проєктування нових автомобільних доріг, реконструкції наявних транспортних коридорів, а також у підготовку техніко-економічних обґрунтувань і комплексних планів розвитку транспортної інфраструктури.*

***Ключові слова:** геоінформаційні системи, дорожнє будівництво, інженерні вишукування, трасування, LiDAR, ВІМ, оптимізація.*

Вступ

У сучасній практиці проєктування автомобільних доріг основна частка вартості будівництва припадає на земляні роботи, що безпосередньо залежать від рельєфу місцевості, трасувального рішення й конструкції дорожнього коридору. Традиційні методи визначення об'ємів виїмки й насипу, що базуються на двовимірних профілях і окремих поперечниках, не забезпечують достатньої точності в умовах складного рельєфу й не дають змоги оперативно порівнювати альтернативні проєктні рішення. У зв'язку з цим у сучасних наукових і прикладних дослідженнях послідовно обґрунтовується необхідність переходу до тривимірних методів аналізу земляних робіт із використанням цифрових моделей рельєфу й параметричних моделей дороги [4, 8, 9].

Аналіз проблеми

У дослідженнях, присвячених інтеграції ВІМ і ГІС у дорожньому будівництві, ГІС-середовище розглядається як базова платформа для опрацювання результатів інженерних вишукувань: топографічної зйомки, матеріалів лазерного сканування, ортофотопланів і допоміжних тематичних шарів. Зокрема в роботах [1–4] та інших авторів обґрунтовано, що саме на етапі підготовки вихідної цифрової моделі рельєфу формується точність подальших розрахунків об'ємів і можливість коректного порівняння проєктних альтернатив. У цьому разі ГІС не замінює систему автоматизованого проєктування доріг, а використовується як аналітичний

інструмент для попереднього оцінювання рельєфних умов і перевірки результатів, отриманих у ВІМ-середовищі.

У практиці застосування QGIS як відкритої ГІС-платформи сформувався стійкий робочий підхід до підготовки вихідних даних для аналізу земляних робіт. Він передбачає імпорт цифрової моделі рельєфу в растровому або триангуляційному вигляді, перевірку й уніфікацію системи координат, контроль роздільної здатності та усунення артефактів інтерполяції.

Дослідження, що порівнюють ЦМР, отримані з різних джерел (лазерне сканування, фотограмметрія з БПЛА, класична топозйомка), підтверджують, що щільність і однорідність вихідних даних мають визначальний вплив на точність обчислення об'ємів, тоді як програмне середовище відіграє другорядну роль за умови коректного налаштування алгоритмів [11, 12].

Подальший етап, який описується в наукових роботах як критичний для задач оптимізації, полягає у формуванні в ГІС проєктної поверхні або імпорту її з ВІМ-системи. У разі інтеграції з AutoCAD Civil 3D проєктна поверхня коридору експортується у форматі LandXML або як триангуляційна сітка, після чого використовується в QGIS для обчислення різниці між наявним і проєктним рельєфом. Такий підхід детально описаний у дослідженнях, автори яких порівнюють результати розрахунків у середовищах ГІС і САПР та доходять висновку, що різниця в об'ємах зазвичай не перевищує кількох відсотків за умови однакової геометричної основи [4, 8].

У межах ГІС-аналізу ключовою операцією є побудова растру різниці висот між наявною та проектною поверхнями. Саме цей растр використовується для кількісного оцінювання об'ємів виїмки й насипу способом інтегрування значень висот по площі комірок. У наукових публікаціях зазначено, що такий підхід дає змогу не лише отримати сумарні об'єми, але й локалізувати ділянки з надмірними земляними роботами, що має вирішальне значення в пошуку альтернатив трасування або коригування поздовжнього профілю дороги. QGIS у цьому контексті використовується як інструмент просторового аналізу, що забезпечує прозорість і відтворюваність результатів [5–7].

Аналіз досліджень свідчить, що найбільшу практичну цінність має поєднання попереднього ГІС-аналізу з подальшим детальним моделюванням у Civil 3D. ГІС дає змогу швидко оцінити вплив рельєфу на обсяги земляних робіт, відібрати доцільні варіанти трасування та відкинути явно неефективні рішення ще до побудови повноцінної коридорної моделі. Це положення підтверджено як у теоретичних роботах, так і в прикладних кейсах, де скорочення кількості проектних ітерацій призводило до зменшення трудомісткості проектування й підвищення обґрунтованості техніко-економічних рішень.

Мета й постановка завдання

Метою дослідження є обґрунтування й апробація робочого підходу до оптимізації земляних робіт у процесі проектування автомобільних доріг на основі інтегрованого використання ГІС-аналізу в середовищі QGIS та параметричного BIM-моделювання в AutoCAD Civil 3D із зосередженням уваги на підготовці й використанні цифрових моделей рельєфу для кількісного оцінювання об'ємів виїмки й насипу.

Предметом дослідження є методи просторового аналізу рельєфу, процедури формування й порівняння наявних і проектних поверхонь, а також інженерні підходи до визначення й балансування об'ємів земляних робіт у проектуванні лінійних транспортних споруд у середовищі інтегрованих BIM- і ГІС-технологій.

Виклад основного матеріалу

У контексті задач оптимізації земляних робіт ключовим напрямом став перехід від двовимірних розрахунків об'ємів до тривимірного порівняння поверхонь наявного й проектного станів. Практичні методики пе-

редбачають формування цифрової моделі рельєфу (ЦМР) за результатами лазерного сканування (LIDAR) або аерофотозйомки БПЛА, побудову проектною поверхні на основі параметричної BIM-моделі коридору й подальше обчислення різниці поверхонь для визначення об'ємів виїмки й насипу. Такі процедури описані в роботах [4, 8, 10], що розглядають порівняння ЦМР/TIN-підходів із коридорним моделюванням у Civil 3D; автори встановлюють, що розбіжності в об'ємах найчастіше зумовлені параметрами інтерполяції, розв'язкою триангуляції та рівнем деталізації моделі.

Низку досліджень [4, 8, 9] присвячено розробленню математичних і алгоритмічних засад оптимізації розташування осі дороги з метою мінімізації сумарних земляних робіт і транспортних витрат на переміщення ґрунту. Підходи передбачають формалізацію задачі як мінімізації функції вартості, що містить складники за об'ємами виїмки / насипу та відстанню перевезення матеріалу, а також застосування параметричного варіантного аналізу для порівняння численних трасувальних рішень. Праці з оптимізації трасування демонструють технічну здійсненість таких підходів і надають алгоритми побудови альтернативних осей і автоматичного обліку земляних мас за кожної альтернативи.

Кейс-дослідження великих міських транспортних об'єктів підтверджують практичну значущість інтеграції BIM і ГІС. На прикладі кільцевої дороги міста Мадрид (проект Calle 30) описано напівавтоматизований робочий процес, в якому BIM-модель і зовнішня база даних були завантажені в платформу керування інфраструктурою для створення гібридної моделі. У цих роботах наголошено, що інтеграція дає змогу централізувати технічну й експлуатаційну інформацію, підвищити якість прийняття рішень під час експлуатації та підготовки ремонтних заходів, однак постає необхідність в уніфікації форматів і процедур для перенесення даних з проектного середовища в систему управління [7].

Практичні дослідження, спрямовані безпосередньо на оптимізацію земляних робіт із використанням BIM-даних, продемонстрували можливість зниження транспортних витрат і кращого балансування земляних мас. Конкретні моделі оптимального розподілу земляних робіт реалізовані на основі BIM-подання проектів доріг, беруть до уваги геометрію коридору, геологічні показники свердловин й вторинні обмеження (кліматичні, екологічні, господарські). Порівняльні дослідження вка-

зують на економічний ефект від застосування таких моделей у межах локальних кейсів, що підтверджено кількома емпіричними дослідженнями останніх років [8–10].

Одночасно із зростанням застосування геоданих і ВІМ у практиці виокремилися методичні й технічні проблеми, що стримують широке впровадження.

По-перше, питання інтероперабельності форматів – конвертація між IFC, CityGML, LandXML і внутрішніми форматами САПР – часто супроводжується втратою атрибутів або зміною геометрії [1, 2, 7].

По-друге, невідповідність систем координат і різна точність джерельної інформації призводять до систематичних похибок у визначенні об'ємів.

По-третє, відсутність стандартизованих процедур верифікації та контролю якості на кожному кроці робочого процесу спричиняє додаткові ризики під час передачі моделі в будівництво або в експлуатацію. Відповідні дослідження наголошують на необхідності формувати робочі шаблони обміну (наприклад, використання LandXML для поверхонь і IFC для елементів інфраструктури) та впроваджувати процедури контролю цілісності даних.

Щодо методів отримання вихідних поверхонь дослідження однозначно вказують на перевагу даних високої щільності (LIDAR або фотограмметрія з БПЛА) для завдань кількісного обліку земляних робіт [11, 12]. Використання щільного хмарного набору точок дає змогу зменшити похибку інтерполяції під час побудови ЦМР/TIN і, як наслідок, підвищити точність розрахунків об'ємів. Водночас праці, у яких порівнюються підходи, демонструють, що навіть за наявності якісного ЦМР різниця між результатами, отриманими в середовищах ГІС (paster-підхід) і САПР (коридорна модель у Civil 3D), може сягати кілька відсотків через різні методи триангуляції та округлення. Інженерна практика вимагає узгодження методів і документування параметрів інтерполяції.

Окрему групу робіт становлять публікації, зосереджені на розробленні інструментів і процедур для побудови цифрового двійника лінійних об'єктів з метою ефективного планування технічного обслуговування й реконструкції. У цих дослідженнях доведено, що інтегрований підхід забезпечує не лише оптимізацію первісних земляних робіт, а й подальшу оптимізацію експлуатаційних втручань, коли наявна гібридна модель дає змогу прогнозувати участь земляних мас для май-

бутніх ремонтів і перепроєктувань. Приклади реального застосування вказують на зменшення тривалості технічних процедур і покращення координації між підрядними організаціями й замовником.

Останні публікації 2024–2025 рр. присвячені створенню спеціалізованого програмного забезпечення й робочих процедур, спрямованих саме на планування земляних робіт у дорожньому будівництві. Дослідники пропонують інструменти для більш точного моделювання шару підоснови, стратифікації ґрунту в моделі, а також модулі для економіко-математичної оптимізації перевезень ґрунту з огляду на локальну інфраструктуру. Ці напрацювання підтверджують поступову еволюцію від концептуальної інтеграції до практичних інструментів, які здатні витіснити частину ручної праці проєктувальника й знизити невизначеність у кошторисах.

Наявні результати ґрунтуються на емпіричних порівняннях і апробації в прикладних кейсах, однак відсутній єдиний узгоджений стандарт робочого процесу для всіх учасників ланцюга (виміри → проєкт → будівництво → експлуатація). Відтак подальша робота має бути спрямована на розроблення нормативних рекомендацій щодо формування вихідних показників (точність ЦМР, формат і структура табличних даних свердловин), процедур контролю якості в процесі конвертації форматів і на створення відкритих шаблонів обміну (LandXML/IFC) для коридорних моделей доріг і супутніх інженерних мереж. Лише така системна стандартизація допоможе забезпечити повторюваність результатів і прогнозований економічний ефект від упровадження інтегрованих технологій у практику інженерного проєктування доріг [11, 12].

Алгоритмічна схема оптимізації земляних робіт

Запропонована алгоритмічна схема оптимізації земляних робіт розглядається як потенційна методика, що може бути застосована в проєктуванні автомобільних доріг і досліджена в подальших наукових роботах (табл. 1). Методика ґрунтується на інтегрованому використанні результатів інженерних вишукувань, оброблених у геоінформаційному середовищі, та параметричного ВІМ-моделювання дорожніх коридорів.

На початковому етапі передбачається збір і підготовка вихідних матеріалів інженерних вишукувань.

Таблиця 1 – Основні етапи й процеси дослідження оптимізації земляних робіт на основі інтеграції BIM і ГІС

№ етапу	Етап дослідження	Процеси й операції	Зміст робіт	Програмне середовище	Вихідні дані / результат
1	2	3	4	5	6
1	Аналіз вихідних матеріалів інженерних вишукувань	Перевірка форматів, систем координат, висотних позначок	Контроль відповідності ЦМР державній або локальній системі координат; аналіз щільності точок, наявності розривів і шумів; оцінювання придатності моделі для обчислення об'ємів	QGIS	Перевірена та узгоджена цифрова модель рельєфу
2	Попереднє оброблення цифрової моделі рельєфу	Фільтрація, інтерполяція, обрізка	Усунення артефактів; приведення ЦМР до єдиного кроку сітки; обрізка по межах досліджуваної ділянки; формування базової моделі наявної поверхні	QGIS	ЦМР, придатна для просторового аналізу
3	Формування наявної поверхні	Створення TIN, налаштування триангуляції	Імпорт ЦМР або точкових даних; побудова поверхні наявного рельєфу з контролем меж і типів ліній розриву; перевірка відповідності геометрії вихідним показникам	Civil 3D	Поверхня наявного рельєфу
4	Аналіз рельєфу для трасування	Аналіз ухилів, експозиції, водозбору	Просторове оцінювання складності рельєфу; виявлення зон потенційно значних земляних робіт; попереднє обґрунтування коридору трасування	QGIS	Карти ухилів і зон складності рельєфу
5	Побудова осі автомобільної дороги	Планове трасування	Формування осі дороги з огляду на рельєф, наявну забудову й обмеження; забезпечення можливості параметричних змін	Civil 3D	Геометрія осі дороги
6	Побудова поздовжнього профілю	Узгодження профілю з рельєфом	Формування проектного профілю з дотриманням нормативних ухилів; мінімізація перевищень виїмки й насипу на профілі	Civil 3D	Поздовжній профіль траси
7	Формування поперечних профілів	Параметризація перерізів	Задання конструкції земляного полотна й дорожнього одягу; параметризація укосів і ширини насипу / виїмки	Civil 3D	Типові поперечні профілі
8	Побудова коридорної моделі	Генерація коридору	Автоматичне формування геометрії земляного полотна вздовж траси; інтеграція осі, профілю й поперечних перерізів	Civil 3D	Коридорна модель дороги
9	Формування проектно поверхні	Генерація поверхні коридору	Створення проектно поверхні земляних робіт на основі коридору; перевірка безперервності й коректності поверхні	Civil 3D	Проектна поверхня
10	Розрахунок об'ємів у BIM-середовищі	Порівняння поверхонь	Визначення об'ємів виїмки й насипу способом порівняння наявної та проектно поверхонь; отримання сумарних значень	Civil 3D	Об'єми земляних робіт (BIM)
11	Експорт проектно поверхні	Передача геометрії	Експорт проектно поверхні у форматі, придатному для ГІС-аналізу; збереження геометричної точності	Civil 3D	Проектна поверхня у форматі обміну

Продовження табл. 1

12	Підготовка поверхонь у ГІС	Уніфікація роздільності	Надання наявній і проєктній поверхням однакової роздільної здатності та системи координат	QGIS	Узгоджені поверхні
13	Обчислення різниці поверхонь	Растровий аналіз	Формування растру різниці висот; просторове розмежування зон виїмки й насипу	QGIS	Растр різниці висот
14	Розрахунок об'ємів у ГІС	Інтегрування значень	Обчислення сумарних об'ємів способом інтегрування значень різниці висот за площею пікселів	QGIS	Об'єми земляних робіт (ГІС)
15	Порівняльний аналіз результатів	Валідація	Порівняння об'ємів, отриманих у ВІМ і ГІС; оцінювання абсолютних і відносних розбіжностей; аналіз причин	QGIS + Civil 3D	Верифіковані результати
16	Аналіз ефективності рішень	Інженерна інтерпретація	Оцінювання впливу трасування й профілю на обсяги земляних робіт; формування рекомендацій щодо оптимізації	Аналітичний етап	Інженерні висновки

Як основні вхідні дані можуть використовуватися цифрові моделі рельєфу, отримані на основі лазерного сканування або фотограмметричної зйомки з безпілотних літальних апаратів, а також матеріали топографічної зйомки. На цьому етапі доцільним є виконання перевірки системи координат, узгодження висотних позначок, аналіз щільності вихідних даних і виявлення потенційних похибок інтерполяції. У науковій літературі з питань обчислення земляних робіт наголошено, що якість цифрової моделі рельєфу є визначальним чинником точності подальших розрахунків, тому цей етап має принципове значення.

На наступному етапі методикою передбачено формування моделі наявної поверхні в середовищі параметричного проєктування доріг. Цифрова модель рельєфу може імпортуватися з контролем геометрії та параметрів триангуляції. Сформовану поверхню доцільно розглядати як базу для подальшого трасування автомобільної дороги й формування поздовжнього профілю. Такий підхід відповідає усталеній практиці ВІМ-проєктування лінійних об'єктів і потенційно дає змогу забезпечити просторову узгодженість усіх елементів моделі.

Наступним етапом методики є формування геометрії траси автомобільної дороги. Передбачається створення осі дороги, узгодженої з наявним рельєфом, з подальшою побудовою поздовжнього профілю з огляду на нормативні вимоги до ухилів і кривизни. Параметричний характер моделі може забезпечувати можливість оперативного коригу-

вання трасувальних рішень без втрати зв'язку з моделлю наявної поверхні, що є необхідною умовою для аналізу альтернатив і оптимізації.

Наступний етап алгоритмічної схеми полягає у створенні коридорної моделі автомобільної дороги з використанням типових поперечних профілів земляного полотна й дорожнього одягу. Коридорна модель у межах методики розглядається як інструмент автоматизованого формування проєктної поверхні, що відображає геометрію земляних робіт уздовж траси. Саме ця проєктна поверхня може бути використана для попереднього визначення об'ємів виїмки й насипу в параметричному середовищі.

Визначення обсягів земляних робіт у ВІМ-середовищі запропоновано здійснювати способом порівняння наявної та проєктної поверхонь. Отримані значення доцільно розглядати як базові для подальшого аналізу й порівняння. У наукових публікаціях зазначено, що такий метод є стандартним для стадій проєкту й робочої документації та за умови коректної геометрії поверхонь може забезпечувати прийнятну інженерну точність.

На наступному етапі методики передбачено передачу проєктної поверхні в геоінформаційне середовище з метою незалежного просторового аналізу. Проєктна поверхня може експортуватися у форматі, придатному для оброблення в ГІС, після чого приводиться до єдиної системи координат із цифровою моделлю рельєфу. У ГІС-середовищі можливе обчислення різниці між наявною та проєктною поверхнями з формуванням растру

різниці висот.

На завершальному етапі алгоритмічної схеми передбачено інтегрування значень різниці висот за площею для встановлення сумарних об'ємів виїмки й насипу в ГІС-середовищі. Отримані результати можуть бути використані для порівняння з показниками параметричного ВІМ-моделювання, а також для аналізу потенційних абсолютних і відносних розбіжностей. Такий підхід широко описаний у науковій літературі як ефективний спосіб валідації розрахунків і може бути застосований для обґрунтування достовірності отриманих значень [8–10].

Алгоритм оптимізації земляних робіт у межах запропонованої методики базується на ітераційному аналізі альтернативних трасувальних рішень із використанням інтегрованих ВІМ- і ГІС-даних. На початковому кроці формується цифрова модель наявного рельєфу, яка приймається як фіксована основа для аналізу. Далі задається початкове трасувальне рішення й формується параметрична модель дороги з відповідною проектною поверхнею (рис. 1).

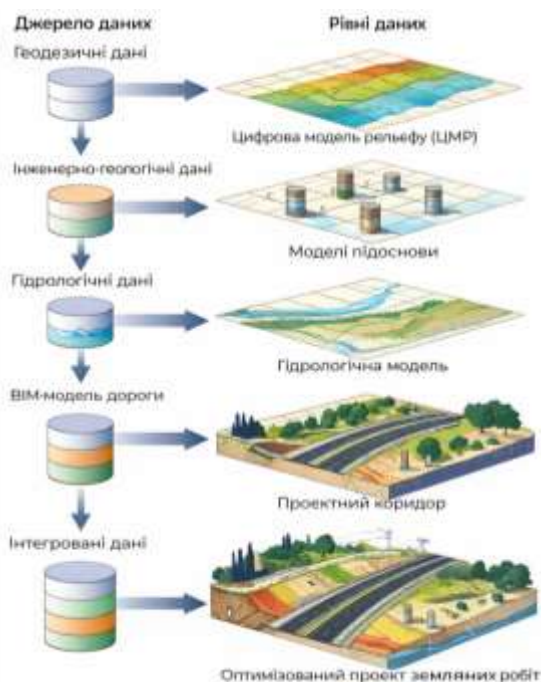


Рис. 1. Схема інтеграції результатів ГІС-аналізу інженерних вишукувань і ВІМ-моделювання в процесі оптимізації земляних робіт автомобільних доріг

Для кожного варіанта трасування можуть визначатися об'єми виїмки й насипу способом порівняння наявної та проектної поверхонь. На основі отриманих значень доцільно оцінювати баланс земляних мас і величину

потенційного переміщення ґрунту. За результатами такого аналізу можуть коригуватися планові або висотні елементи траси з метою зменшення сумарних об'ємів земляних робіт або покращення балансу.

Кожне скориговане трасувальне рішення в межах методики передбачається піддавати повторному циклу моделювання й обчислення об'ємів. Ітераційний процес може продовжуватися до досягнення прийнятних інженерних і економічних показників. Такий підхід відповідає описаному у науковій літературі методам варіантного проектування й може розглядатися як перспективний напрям оптимізації земляних робіт у проектуванні автомобільних доріг.

Висновки

Інтеграція геоінформаційних систем і параметричного ВІМ-моделювання забезпечує кількісну оцінку обсягів земляних робіт на ранніх стадіях проектування автомобільних доріг. Попередній ГІС-аналіз цифрової моделі рельєфу дає змогу обґрунтовано відбирати трасувальні рішення та зменшувати кількість ітерацій параметричного моделювання.

Основними джерелами розбіжностей у результатах є методи інтерполяції поверхонь і просторова роздільна здатність цифрової моделі рельєфу.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на стандартизацію процедур обміну інформацією між ВІМ- і ГІС-середовищами та розроблення єдиних вимог до вихідних цифрових моделей рельєфу.

Література

1. El-Mekawy M., Östman A., Hijazi I. A unified building model for 3D urban GIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2012. Vol. 1, No. 1. P. 120–145. DOI: 10.3390/ijgi1010120.
2. El-Mekawy M., Hijazi I., Ebrahim M. Integrating BIM and GIS for 3D city modelling: A case study of IFC and CityGML. *Proceedings of the ISPRS Workshop*. 2010. P. 1–6.
3. Kim H., Anderson K., Lee S., Hildreth J. Generating construction schedules through automatic extraction of spatial information from BIM. *Automation in Construction*. 2013. Vol. 35. P. 285–295. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.05.020.
4. Kim H., Lee S. An earthwork optimization model for road construction using BIM. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2015. Vol. 21, No. 6. P. 776–789. DOI: 10.3846/13923730.2014.897966.
5. Biancardo S. A., Viscione N., Cerbone A., Dessì G. BIM-based approach for road infrastructure

- maintenance. *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 45. P. 199–206. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.02.086.
6. Biancardo S. A., Intignano M., Viscione N. A BIM-based approach for road design and management. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019. Vol. 10, No. 2. P. 1482–1495.
 7. Cepa J., Gallego A., Jerez J., Molina-Solana M. Towards BIM–GIS integration for road infrastructure management: The Madrid Calle 30 case study. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 3. Article 1456. DOI: 10.3390/app13031456.
 8. Zhao X., Zhang J., Liang D. A BIM-based framework for earthwork quantity takeoff and optimization in linear infrastructure. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 114. Article 103153. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103153.
 9. Yu L., Wang Y., Zhang X. Earthwork allocation optimization of road engineering based on BIM. *Advances in Civil Engineering*. 2022. Vol. 2022. Article ID 8745623. DOI: 10.1155/2022/8745623.
 10. Peña J. M., Molina-Solana M., Ros M. BIM-based tool to support earthworks planning in road construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2024. Vol. 150, No. 2. Article 04023115. DOI: 10.1061/JCEMD4.0001934.
 11. Axelsson P. ЦМР generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2000. Vol. 33, Part B4. P. 110–117.
 12. Aguilar F. J., Aguilar M. A., Agüera F., Carvajal F. Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid ЦМР accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2005. Vol. 71, No. 7. P. 805–816.
 13. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project: офіц. док. 2023. URL: <https://qgis.org> (дата звернення: 18.01.2026).
 14. Autodesk Inc. AutoCAD Civil 3D User's Guide: офіц. док. San Rafael, CA, 2023.
 15. Autodesk Inc. Infrastructure Design and Earthwork Analysis in Civil 3D: Technical Documentation. 2022.
- BIM. *Automation in Construction*. 2013. Vol. 35. P. 285–295. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.05.020.
4. Kim H., Lee S. An earthwork optimization model for road construction using BIM. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2015. Vol. 21, No. 6. P. 776–789. DOI: 10.3846/13923730.2014.897966.
 5. Biancardo S. A., Viscione N., Cerbone A., Dessi G. BIM-based approach for road infrastructure maintenance. *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 45. P. 199–206. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.02.086.
 6. Biancardo S. A., Intignano M., Viscione N. A BIM-based approach for road design and management. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019. Vol. 10, No. 2. P. 1482–1495.
 7. Cepa J., Gallego A., Jerez J., Molina-Solana M. Towards BIM–GIS integration for road infrastructure management: The Madrid Calle 30 case study. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 3. Article 1456. DOI: 10.3390/app13031456.
 8. Zhao X., Zhang J., Liang D. A BIM-based framework for earthwork quantity takeoff and optimization in linear infrastructure. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 114. Article 103153. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103153.
 9. Yu L., Wang Y., Zhang X. Earthwork allocation optimization of road engineering based on BIM. *Advances in Civil Engineering*. 2022. Vol. 2022. Article ID 8745623. DOI: 10.1155/2022/8745623.
 10. Peña J. M., Molina-Solana M., Ros M. BIM-based tool to support earthworks planning in road construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2024. Vol. 150, No. 2. Article 04023115. DOI: 10.1061/JCEMD4.0001934.
 11. Axelsson P. ЦМР generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2000. Vol. 33, Part B4. P. 110–117.
 12. Aguilar F. J., Aguilar M. A., Agüera F., Carvajal F. Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid ЦМР accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2005. Vol. 71, No. 7. P. 805–816.
 13. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project: офіц. док. 2023. URL: <https://qgis.org> (дата звернення: 18.01.2026).
 14. Autodesk Inc. AutoCAD Civil 3D User's Guide: офіц. док. San Rafael, CA, 2023.
 15. Autodesk Inc. Infrastructure Design and Earthwork Analysis in Civil 3D: Technical Documentation. 2022.

References

1. El-Mekawy M., Östman A., Hijazi I. A unified building model for 3D urban GIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2012. Vol. 1, No. 1. P. 120–145. DOI: 10.3390/ijgi1010120.
 2. El-Mekawy M., Hijazi I., Ebrahim M. Integrating BIM and GIS for 3D city modelling: A case study of IFC and CityGML. *Proceedings of the ISPRS Workshop*. 2010. P. 1–6.
 3. Kim H., Anderson K., Lee S., Hildreth J. Generating construction schedules through automatic extraction of spatial information from
- Полев Володимир Олексійович, канд. техн. наук, доц. кафедри будівництва,

міського господарства та архітектури,
v.a.popov.vntu@gmail.com,

ORCID 0000-0003-2379-7764;

Бондар Альона Василівна, канд. техн. наук,
доц. кафедри будівництва, міського господарства
та архітектури,

bondarav@vntu.edu.ua,

ORCID 0000-0002-8098-1181;

Максименко Марина Аркадіївна, канд. техн.
наук, старший викладач кафедри будівництва,
міського господарства та архітектури,

maksymenko@vntu.edu.ua,

ORCID 0000-0003-1345-8144;

Постолатій Маріанна Олександрівна, аспірантка
кафебри будівництва, міського господарства та
архітектури,

postolatiu@gmail.com,

ORCID 0009-0008-1054-1018.

Вінницький національний технічний університет,
21021, Україна, м. Вінниця, Хмельницьке шосе,
95.

Optimization of Earthwork Based on the Integration of BIM and GIS Surveys in Highway Design

Abstract. Problem. Earthworks constitute a dominant share of the total cost of road construction and are highly sensitive to terrain morphology and alignment decisions. Conventional 2D methods based on longitudinal and cross-sections often fail to provide sufficient accuracy and do not support rapid comparison of design alternatives under complex topographic conditions. The growing adoption of BIM and GIS technologies creates new opportunities for improving earthwork planning; however, the lack of a unified and validated workflow for their integrated use limits practical implementation. **Goal.** The aim of the study is to substantiate and test an integrated methodological approach to earthwork optimization in road design through the combined use of GIS-based analysis in QGIS and parametric BIM modelling in AutoCAD Civil 3D. **Methodology.** The research is based on the development of an iterative algorithm that integrates digital terrain model (DTM) preparation, parametric corridor modelling, and raster-based surface comparison. High-resolution terrain data obtained from LiDAR, UAV photogrammetry, or topographic surveys are processed in a GIS environment to ensure coordinate consistency and data quality. The road corridor is then modelled parametrically in a BIM environment, followed by bidirectional data exchange (LandXML/TIN) and independent volume calculations in both environments with subsequent

validation. **Results.** An algorithmic workflow for earthwork optimization was formalized and systematized. The study demonstrates that preliminary GIS analysis enables early identification of terrain constraints and supports the selection of rational alignment options, while BIM modelling ensures detailed quantitative assessment. The combined approach improves transparency of calculations and reduces the number of design iterations. **Originality.** The scientific novelty lies in the structured integration of GIS-based terrain analytics with BIM corridor modelling into a unified, verifiable workflow focused specifically on earthwork optimization and cross-environment validation. **Practical value.** The proposed approach can be applied in the design and reconstruction of highways, feasibility studies, and transport infrastructure planning, contributing to improved accuracy of earthwork estimates, reduced design time, and better-informed engineering decisions.

Keywords: geographic information systems, road construction, engineering surveys, tracing, LiDAR, BIM, optimization.

Popov Volodymyr, PhD (Engineering), Assoc. Prof.,
Department of Construction, Urban Economy and
Architecture,

v.a.popov.vntu@gmail.com,

ORCID 0000-0003-2379-7764;

Bondar Alona, PhD (Engineering), Assoc. Prof.,
Department of Construction, Urban Economy and
Architecture,

bondarav@vntu.edu.ua,

ORCID 0000-0002-8098-1181;

Maksymenko Maryna, PhD (Engineering),
Senior Lecturer, Department of Construction, Urban
Economy and Architecture,

maksymenko@vntu.edu.ua,

ORCID 0000-0003-1345-8144;

Postolatii Marianna, Postgraduate Student,
Department of Construction, Urban Economy and
Architecture, postolatiu@gmail.com,

ORCID 0009-0008-1054-1018.

Vinnitsia National Technical University,
95 Khmelnytske Shose, Vinnitsia, 21021, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received:
05.01.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised
and Accepted: 15.01.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026