

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Камінський Богдан Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
« Дослідження можливостей застосування LiDAR-технології для
моніторингу стану залізничної колії »
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

Б. Камінський, студент групи ГЗ-22-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: **к.т.н., доц. Олеськів Роксолана Євгенівна**
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата)

проф. Микола ПРИХОДЬКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада)

(підпис) (дата)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

"__" _____ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Камінський Богдан Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: « Дослідження можливостей застосування LiDAR-технології для моніторингу стану залізничної колії »

керівник роботи: _____

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

затверджена наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ року

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Сучасний стан та проблеми моніторингу залізничної колії
2. Теоретичні основи LiDAR – технології та її застосування для моніторингу залізничної інфраструктури
3. Методологія дослідження

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Сучасний стан та проблеми моніторингу залізничної колії		
2	Теоретичні основи LiDAR – технології та її застосування для моніторингу залізничної інфраструктури		
3	Методологія дослідження		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

Камінський Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Анотація

У межах цієї дипломної роботи здійснено аналіз потенціалу використання технології LiDAR для контролю фактичного стану залізничних колій на українській території.

Зважаючи на те, що транспортна інфраструктура зазнає дедалі більших експлуатаційних навантажень, а потреба у швидкому ідентифікуванні будь-яких викривлень та гарантуванні безпеки залізничного сполучення зростає, запровадження високоточних технік дистанційного зондування набуває надзвичайної важливості.

Було здійснено розгляд засад функціонування лазерного сканування та його домінації над загальноприйнятими геодезичними підходами у сфері моніторингу залізничного шляху.

Досліджено потенціал застосування наземних, пересувних та безпілотних систем LiDAR-сканування з метою встановлення точних вимірів конфігурації рейкового полотна, калібрування осідання основи насипу, ідентифікації нахилів, розбіжностей колії та іншого роду вад.

Основний акцент зроблено на припасуванні технології до реалій української системи координат – УСК-2000, а також на вбудовуванні здобутої інформації у геоінформаційні платформи задля наступних опрацювань та формування електронних макетів інфраструктури.

Проведено розрахунок відповідності (точності), темпів збору відомостей та фінансової вигоди використання LiDAR для нагляду за залізничними спорудами у різних територіях нашої країни.

Вивчення, що було проведено, демонструє значний потенціал застосування технологій LiDAR задля автоматизованого й швидкого моніторингу стану залізничного полотна.

Це, своєю чергою, має призвести до покращення показників безпеки руху, скорочення фінансових витрат, пов'язаних з інспектуванням, та оптимізації процесів планування ремонтно-відновлювальних заходів.

Ключові слова: LiDAR-технологія, лазерне сканування, моніторинг залізничної колії, мобільне лазерне сканування, УСК-2000.

Abstract

Within the framework of this thesis, the potential of using LiDAR technology to monitor the actual condition of railway tracks on Ukrainian territory was analyzed.

Given that the transport infrastructure is experiencing increasing operational loads, and the need to quickly identify any distortions and ensure the safety of railway communication is growing, the introduction of high-precision remote sensing techniques is becoming extremely important.

The principles of laser scanning and its dominance over generally accepted geodetic approaches in the field of railway monitoring were considered.

The potential of using ground-based, mobile and unmanned LiDAR scanning systems to establish accurate measurements of the rail bed configuration, calibrate the subsidence of the embankment base, identify slopes, track divergences and other types of defects was investigated.

The main emphasis is placed on adapting the technology to the realities of the Ukrainian coordinate system - USK-2000, as well as on embedding the obtained information into geoinformation platforms for subsequent processing and formation of electronic infrastructure models.

The calculation of the compliance (accuracy), data collection rates and financial benefits of using LiDAR for monitoring railway structures in different territories of our country was carried out.

The study that was conducted demonstrates the significant potential of using LiDAR technologies for automated and rapid monitoring of the condition of the railway track.

This, in turn, should lead to improved traffic safety indicators, reduced financial costs associated with inspection, and optimization of the processes of planning repair and restoration measures.

Keywords: LiDAR technology, laser scanning, railway track monitoring, mobile laser scanning, USK-2000.

ЗМІСТ

Вступ

1. Сучасний стан та проблеми моніторингу залізничної колії

1.1 Проблеми водовідведення та роль дренажних систем у забезпеченні довговічності колії

1.2 Існуючі методи діагностики стану колії та обмеження традиційних підходів

2. Теоретичні основи LiDAR – технології та її застосування для моніторингу залізничної інфраструктури

2.1 Класифікація LiDAR-систем та їх придатність для залізничної інфраструктури

2.2 Застосування LiDAR для моніторингу залізничної інфраструктури

3 Методологія дослідження

3.1 Алгоритм виявлення водовідвідних каналів за даними LiDAR

3.2 Оцінка точності та аналіз похибок алгоритму виявлення каналів

3.3 Оцінка стану водовідвідної каналу

3.4 Кореляційний аналіз результатів LiDAR та GPR

3.5 Дослідження часових рядів

Висновок

Список використаної літератури

Вступ

Залізничний рух складає одну з найважливіших ланок транспортної інфраструктури в Україні, маючи вирішальне значення для підтримки фінансової сталості, логістичних операцій та здатності до оборони країни.

З огляду на активне використання залізничної мережі, примноження обсягів перевезень вантажів, а також нагальну потребу в швидкому відновленні пошкоджених об'єктів після завершення бойових дій, надзвичайно гостро стоїть завдання впровадження надійного контролю за технічним станом самого залізничного шляху.

Усталені способи перевірки габаритів залізничної колії спираються на застосування апаратури, що контактує з об'єктом, геодезичних засобів, а також планових оглядів, котрі вимагають солідних витрат праці та часу.

Ба більше, подібні підходи не завжди гарантують постійний моніторинг та оперативне виявлення невеликих деформацій, осідань основи, нахилів рейок чи варіацій у міжрейковій відстані.

Нині ж на часі потреба у швидких, механізованих та дистанційних технологіях для накопичення просторової інформації.

Одним із найбільш багатонадійних технологічних рішень у галузі нагляду за інфраструктурою є LiDAR (Light Detection and Ranging) — технологія дистанційного лазерного зондування, яка уможлиблює збір надзвичайно точних тривимірних відомостей про різноманітні об'єкти та топографію території.

Залежно від конкретних вимог дослідницького завдання, системи LiDAR можуть функціонувати у вигляді наземних сканерів (TLS), мобільних сканувальних комплексів (MLS) або бути інтегровані у безпілотні літальні апарати (UAV LiDAR), що надає значну варіативність у методах їх використання.

Застосування системи LiDAR для нагляду за залізничним шляхом дає змогу збирати насичені хмари точок із високою, до міліметра, точністю, створювати цифрові теренові моделі, точно встановлювати координати рейок, оцінювати стан баласту та суміжних елементів інфраструктури.

Інтеграція лазерного сканування з навігаційними супутниковими системами (наприклад, методами RTK) дає змогу прив'язувати отримані виміри до національної системи координат УСК-2000, а також ефективно використовувати ці дані в геоінформаційних комплексах для подальшого опрацювання, створення віртуальних копій та формування обґрунтованих управлінських рішень.

Щодо теренів України, запуск LiDAR-моніторингу має особливу вагу, беручи до уваги велику довжину залізничних шляхів, різноманітність природних ландшафтів (від гірських масивів Карпат до вологих теренів Полісся, зон, схильних до затоплення, а також ділянок із ризиком зсувів) і нагальну потребу в швидкому нагляді за потенційно ризикованими відрізками.

Цей метод дає змогу як проводити разові перевірки, так і формувати базу для тривалих систем спостереження за змінами рельєфу.

Завданням цієї бакалаврської роботи вивчення потенціалу використання технології LiDAR для спостереження за станом залізничного шляху на території України, а також аналіз її спроможності, продуктивності та обґрунтованості інтеграції у щоденну інженерно-геодезичну підтримку залізничних об'єктів.

Для здобуття поставленої цілі заплановано виконання наступних кроків:

- Розгляд актуальних способів нагляду за станом залізничного шляху;
- Вивчення засад функціонування та технічних особливостей LiDAR-апаратури;

- Проведення експертизи спроможності лазерного сканування у вимірюванні конфігураційних характеристик колії;
- Припасування знайдених даних до вимог державної системи координат УСК-2000;
- З'ясування потенціалу впровадження інформації з лідарів у геоінформаційні системи для потреб контролю стану інфраструктури.

Отже, це дослідження становить собою спробу довести слушність інтеграції технологій LiDAR як засобу для здійснення цифрового перетворення механізмів нагляду за станом залізничної інфраструктури на території України.

1. Сучасний стан та проблеми моніторингу залізничної колії

Рейковий транспорт вважається однією з найбільш ощадливих у плані енергоспоживання та екологічно чистих систем для транспортування як людей, так і товарів.

Для нашої держави, України, він відіграє ключову, стратегічну роль, підтримуючи роботу внутрішніх логістичних ланцюгів, міжнародних транспортних шляхів та експортних обсягів.

В епоху, коли тривають роботи з відбудови та оновлення інфраструктурних об'єктів, прогнозується посилення частоти руху поїздів, що неминуче призведе до підвищення тиску на складові частини залізничного полотна.

Зростання кількості перевезених вантажів та пасажирів спричиняє інтенсивніше руйнування елементів верхньої будови колії: рейок, елементів кріплення, баласту та основи.

Тиск, який чинить рухомий склад під час руху, викликає поступове накопичення постійних деформацій.

Ці зміни видно як опускання, нахили, порушення рівності поздовжнього профілю та зміну ширини між рейками.

Якщо графік руху дуже насичений, час, доступний для виконання запобіжних заходів та ретельного технічного огляду, стає вкрай обмеженим.

Отже, наростання обсягів транспортних перевезень диктує потребу впроваджувати передові системи нагляду, котрі здатні гарантувати оперативний, достовірний та постійний моніторинг стану технічних об'єктів інфраструктури без суттєвого втручання у поточну експлуатаційну діяльність.

1.1 Проблеми водовідведення та роль дренажних систем у забезпеченні довговічності колії

Вода виступає одним із головних елементів, що спричиняють зношення залізничного шляху.

Коли шар баласту та саме полотно перезволожені, їхня здатність тримати навантаження падає, що, своєю чергою, провокує формування пластичних зсувів, виступання ґрунту та утворення нерівностей.

Це призводить до виникнення місцевих занурень, які ставлять під загрозу безпеку руху транспорту та зменшують загальний ресурс складових частин колії.

Вода може зустрічатися у складі колійної системи у різних проявах:

- вода, що збирається на поверхні та схилах після дощів чи снігопадів;
- вода, що просочується крізь компоненти конструкції;
- вогкість, що утримується в ґрунтах за рахунок капілярних сил;
- води, що знаходяться у водоносному горизонті;
- вода, що тече паралельно шарам земної кори.

Аби зменшити небажаний вплив, використовують відкриті рови, водовідвідні жолоби та підземні системи водовідведення.

Те, наскільки якісно вони працюють, визначається їхніми розмірами (форма, нахил, глибина), якістю покриття, а також ступенем замулення та заростання.

На залізничному транспорті, коли перевіряють стан дренажних мереж, зазвичай покладаються на візуальний огляд.

Цей метод є упередженим і не дає змоги визначити точні цифри, що характеризують гідравлічну продуктивність чи відхилення у розмірах.

Брак засобів для прямого вимірювання стану дренажних конструкцій на поверхні породжує лакуну у загальній системі нагляду за станом об'єктів залізниці.

Це питання набуває особливої гостроти саме на території України, оскільки варіативність природних зон (території, схильні до затоплення, гірські місцевості, ділянки зі складною геологічною основою) загострює небезпеку збоїв у роботі систем водовідведення.

1.2 Існуючі методи діагностики стану колії та обмеження традиційних підходів

Актуальні методи моніторингу стану залізничного полотна охоплюють застосування спеціальних інспекційних вагонів, геодезичного обладнання, інерційних вимірювальних модулів та георадарних установок.

На сьогоднішній день значну частину геометричних характеристик колії можна зафіксувати з високим ступенем точності, до яких належать:

- відстань між рейками;
- різниця у висоті між рейками;
- профілі колії у поздовжньому та поперечному напрямках;
- зміщення відносно проєктного плану;
- координатне розташування рейок у просторі.

Завдяки георадарним дослідженням стає можливим збір відомостей стосовно стану шарів, що знаходяться під поверхнею, визначення рівня зволоження, інтенсивності забруднення матеріалу баласту та промірів (геометрії) елементів колійного профілю.

Водночас, певні методи аналізу, як-от фрактальний підхід до вивчення поздовжнього контуру, дають змогу ідентифікувати типи деградації, спираючись на спектральний аналіз частотних характеристик (довжин хвиль) нерівностей.

Однак, згадані підходи переважно констатують результати збоїв (викривлення, асиметрія, падіння несучої здатності), аніж дають прямий числовий опис стану елементів водовідведення.

Також, деякі з наявних методик вимагають прямого дотику для зняття показників чи значних часових витрат на аналіз отриманої інформації.

З огляду на збільшення робочих навантажень та наявність вузьких проміжків для проведення ремонтних чи оглядових робіт, нагальною стає потреба в інтеграції дистанційних, швидкісних та повністю автоматизованих способів збору інформації про просторове розташування об'єктів.

У цьому контексті, LiDAR-технологія виглядає як один із найбільш перспективних шляхів, оскільки вона дає змогу формувати докладні тривимірні аналоги колійного полотна та систем водовідведення, створюючи базу для переходу до чисельного (цифрового) контролю їхнього стану.

2. Теоретичні основи LiDAR – технології та її застосування для моніторингу залізничної інфраструктури

Технологія лазерного далекоміра (LiDAR) доволі давно знайшла своє застосування у сфері транспорту й абсолютно не є чимось незвичним у щоденній роботі інженерів.

Найяскравіший випадок її впровадження — це системи для самокерованих авто, де сканування лазером є наріжним каменем у комплексі датчиків, що відповідають за "бачення" машиною оточення.

Через свою спроможність створювати надзвичайно деталізовані просторові тривимірні макети, LiDAR дає змогу рухомим засобам розпізнавати як сторонні предмети, так і розмітку на дорозі, частини дорожньої споруди й інші складові середовища, причому без жодної затримки.

У сфері залізничного транспорту ця технологія теж має втілення на практиці.

Зокрема, її залучають задля створення просторових мап ділянок уздовж рейок, з'ясування стану рослинності довкола та оцінки загроз від падіння дерев на залізничну колію.

Подібні вивчення вже проводилися на залізничних системах Європи, де LiDAR допоміг сформувати цифрові образи смуг відведення і виявити об'єкти, що становлять загрозу в робочому габариті.

Функціональна основа роботи LiDAR-сканера закладена у принципі обліку часу, який потрібен лазерному імпульсу для подорожі до об'єкта і назад (це відомо як Time of Flight, ToF).

За суттю, цей метод споріднений до механізмів, що застосовуються у радіолокаційних установках (RADAR), але тут замість радіохвиль задіяні саме світлові сплески.

Світло генерується лазером, який формує сфокусовані пучки світла у межах інфрачервоного, видимого або ультрафіолетового діапазонів.

Коли цей промінь потрапляє на якесь тіло, певна частка його енергії повертається назад і фіксується приймальним елементом.

Визначення проміжку від датчика до цілі відбувається завдяки прорахунку інтервалу, за який імпульс долає шлях до об'єкта та повертається.

Беручи до уваги швидкість світла, просторове розташування точки, від якої відбулося відбиття, можна обчислити з великою точністю.

У результаті цього формується набір координат, які разом складають точковий масив — цифрову модель справжньої площини.

З метою здійснення контролю за станом залізничних об'єктів, у межах проведених наукових робіт застосовувався 3D-лазерний апарат з повним охопленням у 360 градусів.

Випромінювання відбувалося в інфрачервоному спектрі, що гарантує надійність функціонування незалежно від рівня зовнішнього освітлення та мінімізує вплив факторів, спричинених атмосферою.

Даний сканер монтувався на рухому платформу (транспортний засіб), що пересувалася колією.

За рахунок безперервного руху створювався поздовжній переріз, а також об'ємне візуальне представлення елементів інфраструктури, що знаходяться поруч із залізничним насипом.

Шляхом інтеграції лазерного сканування по колу та лінійного переміщення робочої платформи формується високоточна тривимірна модель рельєфу місцевості.

Ця методика дає змогу не тільки детально вивчати розміри та конфігурацію залізничного шляху, але й проводити оцінку стану всіх супутніх елементів: земляного полотна, дренажних систем, схилів, стовпів

контактної мережі, а також рослинності, що знаходиться у межах встановлених охоронних зон.

Таким чином, LiDAR у залізничній сфері дає змогу відмовитися від точкових інспекцій на користь повноцінного просторового контролю.

Це критично важливо для формування цифрових близнюків інфраструктури та запровадження механізмів передбачувального ремонту.

За рахунок неперервного руху апаратури, встановленої на транспорті, фіксується повна картина оточення залізничного полотна (рис. 1).

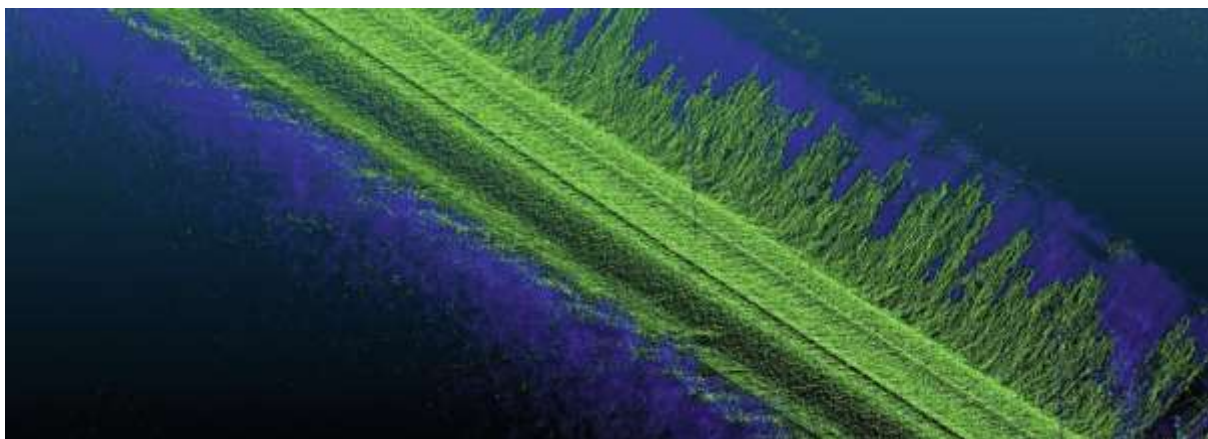


Рис. 1. Візуалізація вхідних даних на прикладі ділянки колії

Найкращий варіант застосування MLS – це для довгих лінійних споруд, як-от залізничні шляхи.

Зібрані дані LiDAR містять інформацію про відстані від точок сканування до опорної точки (що визначається як точка, де проходить вісь колії та поверхня рейки) та показники інтенсивності відбиття.

До того ж, використовуючи софт LAS, є можливість провести сортування даних на першому етапі для відокремлення точок землі від рослинності.

2.1 Класифікація LiDAR-систем та їх придатність для залізничної інфраструктури

З огляду на метод розміщення та рухливість, системи LiDAR класифікують наступним чином:

- Сканування наземне лазерне (TLS)
- TLS застосовується, коли сканер нерухомий. Такий метод дає змогу досягти міліметрової точності та отримати дуже насичений масив точок.

Сильні сторони:

- Геометрична точність, що вирізняється високим рівнем;
- Можливість детально зафіксувати стан колій, елементів, що підтримують рейки (шпали), та насипу (баласту);
- Реальна можливість досліджувати невеликі, локальні порушення.

Слабкі місця:

- Потреба у встановленні значної кількості точок сканування;
- Відносно невисока швидкість збору даних;
- Обов'язковість припинення (переривання) залізничного руху для проведення робіт.

Лазерне сканування з мобільного комплексу (МЛС)

МЛС монтується на транспортних засобах, що знаходяться у русі (спеціалізовані причеми чи легкові автівки).

Ключові переваги цього методу:

- Стрімке охоплення значних територій;
- Фактично нульове втручання у звичний робочий процес;
- Корегування даних за допомогою супутникових навігаційних систем та інерціальних вимірювальних блоків (GNSS/INS).

2.2 Застосування LiDAR для моніторингу залізничної інфраструктури

Завдяки LiDAR можна збирати просторові відомості задля проведення аналізу:

- параметрів геометрії залізничної колії (відстань між рейками, різниця висот, радіус вигину);
- профілів, як подовжніх, так і поперечних;
- стану шару баласту;
- конфігурації відкритих дренажних систем;
- осідання насипних споруд;
- змін форми елементів робочого тіла;
- наявності та розмірів рослинності на території відведення.

Цей потенціал має застосування лазерного сканування (LiDAR) для таких завдань:

1. Визначення геометричних параметрів дренажних систем

Це дає змогу вимірювати градієнти, глибину, профіль у поперечному перерізі та рівень замулення.

2. Локалізації ділянок, де збирається вода

Опрацювання цифрових моделей рельєфу (ЦМР) дає можливість симулювати шляхи водостоку.

3. Режиму відстеження змін у часі

Зіставлення точкових масивів, отриманих у різні моменти часу, дає змогу ідентифікувати деформаційні процеси.

4. Включення у геоінформаційні системи (ГІС)

Отримані відомості можна завантажувати у просторові бази даних для формування електронних планів із відображенням стану об'єктів.

3 Методологія дослідження

3.1 Алгоритм виявлення водовідвідних каналів за даними LiDAR

На початковій стадії пропонованого підходу відбувається машинне з'ясування факту присутності дренажної каналу у межах кожного поперечного розрізу, що формується на основі хмари точок, отриманих за допомогою LiDAR.

Ідентифікація каналу відбувається через дослідження геометричних ознак рельєфу у заданому перерізі.

Визначальною характеристикою для знаходження каналу є місцезнаходження найнижчої точки висоти у поперечному профілі.

За найнижчу точку поверхні приймається можлива нижня межа (підшва) каналу.

Окрім того, береться до уваги її позиція стосовно середньої лінії колії, що допомагає відсіяти випадкові нерівності місцевості, які не належать до водовідвідної системи.

Коли необхідні геометричні умови дотримані, програма продовжує працювати до етапу розбиття на сегменти ділянки каналу.

До цієї ділянки каналу зараховуються усі точки рельєфу, якщо їхня різниця по висоті не більше ніж 0,07 метра стосовно найнижчої зафіксованої позначки.

Даний ліміт встановлено, беручи до уваги стандартну будову дренажних систем водовідведення, які зазвичай формуються у вигляді трапеції з доволі пласкою основою.

Опрацювавши набір точок, котрі окреслюють борозну, здійснюється обчислення її просторових характеристик.

Ширина цієї борозни встановлюється як горизонтальний проміжок, що вміщує крайні точки виділеної зони у межах поперечного перерізу.

Щодо глибини, її можна визначити як розбіжність між середнім рівнем прилеглої площини та найнижчою позначкою основи.

Окрім того, встановлюються такі геометричні параметри:

- висота найнижчої точки у прив'язці до верхівки рейки;
- зсув каналу по горизонталі відносно центральної лінії шляху;
- довжина окресленої зони вздовж колії.

Аби зменшити кількість хибних активацій програмного забезпечення, запроваджуються критерії фільтрування. Конкретно, встановлюються такі порогові величини:

- найменша можлива ширина канавки;
- найбільша припустима ширина канавки;
- мінімальна протяжність вздовж осі руху.

Це дає змогу не враховувати незначні нерівності рельєфу, які не причетні до елементів системи відведення води.

Певні проблеми можуть трапитись, коли присутні екрани для захисту від шуму, підпірні конструкції або на ділянках із надзвичайно пласкою місцевістю, де практично немає помітних змін висоти.

Тут може бути корисним додатково застосувати аналіз оточення (наприклад, класифікацію елементів у хмарі точок) або використати дані із сусідніх поперечних перерізів, аби підвищити надійність отриманих даних.

Запропонована методика дає змогу автоматично знаходити та визначати характеристики дренажних ровів на підставі просторових відомостей LiDAR, формуючи таким чином підґрунтя для наступного вивчення того, наскільки ефективно вони відводять воду, а також їхнього інженерного стану.

3.2 Оцінка точності та аналіз похибок алгоритму виявлення канав

Перевірка того, наскільки коректно працює вигаданий метод знаходження водовідвідних жолобів, є обов'язковою стадією, аби довести, що його можна впроваджувати у систему нагляду за залізничними шляхами.

Під час цього розбору беруться до уваги всі чинники, що можуть спотворити результат, як-от недоліки апаратури для вимірів, так і помилки, що виникають під час комп'ютерної обробки зібраних відомостей.

Загальна неточність у визначенні розмірів канав виникає внаслідок дії низки чинників:

1. Помилки апаратури LiDAR-комплексу

- дисперсія вимірювання відстані (σ_{range});
- похибка визначення просторового положення та орієнтації (INS) (σ_{INS});
- неточність визначення координат за допомогою GNSS (σ_{GNSS});
- помилка калібрування всього обладнання (σ_{cal}).

2. Недоліки, пов'язані з виділенням геометрії

- вплив встановленого порогового значення висоти (що становить 0,07 м);
- наявність сторонніх домішок (шуму) у наборі точок;
- нерегулярний розподіл щільності згенерованих точок.

3. Помилки, притаманні математичному опису

- зведення реальної форми русла до спрощеної – трапеції;
- використання дискретного набору замість безперервних перерізів;
- похибки, що виникають при апроксимації (наближеному описі) поверхні.

Загальна похибка визначення координат точки у просторі, обрахована як середньоквадратична величина, може бути виражена наступним чином:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{range}^2 + \sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{INS}^2 + \sigma_{cal}^2}$$

Щодо систем MLS, то в режимі реального часу кінематики (RTK) передбачувана точність позиціонування у просторі лежить у межах 10–20 міліметрів.

Це цілком задовольняє вимоги для вимірювання геометричних характеристик водостоків із похибкою, що не перевищує 2–3 сантиметри.

Чіткість визначення габаритів ширини каналу напряму корелює з похибкою горизонтальної складової вимірюваних координат:

$$\sigma_{width} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

Точність визначення глибини рову стримується вертикальною похибкою:

$$\sigma_{depth} = \sigma_z$$

Зважаючи на те, що для завдань дренажу вирішальне значення мають коливання глибини в межах 10–30 мм, суттєва увага акцентується на сталості вертикальної складової координат.

Вживання незмінного ліміту у розмірі 0,07 м здатне спричинити наступні наслідки:

- Неспроможність розпізнати канали у зонах, де присутнє часткове занесення мулом;
- Хибне спрацювання, що включає сусідні нерівності територій.

Щоб мінімізувати дію цієї обставини, варто запровадити наступні методи:

- Поріг, що самостійно налаштовується, котрий залежить від того, наскільки грубою є місцева поверхня;
- Робіт з вирівнювання профілю за допомогою техніки рухомого середнього показника;
- Методи статистичного очищення від перешкод (наприклад, фільтрування за медіаною).

Описаний метод показує значну продуктивність на відрізках, де профіль каналу є очевидним.

Водночас, певні обставини можуть спричинити проблеми:

- Територія, що є майже пласкою, без помітного нахилу поперек об'єкта;
- Присутність екрануючих мурів від шуму чи будь-яких інших високих елементів;
- Густа рослинність, що створює перешкоди;
- Перешкоди для прийому сигналу супутникових навігаційних систем (GNSS).

Щоб покращити стійкість результатів, варто запровадити такі підходи:

- Об'єднання інформації з декількох послідовних вимірювань;
- Сортування точок хмари за типом об'єкта (грунт / зелені насадження / штучні споруди);
- Застосування усереднених цифрових моделей рельєфу (ЦМР).

3.3 Оцінка стану водовідвідної каналу

Лишивши позаду автоматичне визначення габаритів рову, ми переходимо до оцінки його реального технічного стану.

Важливою мірою роботи осушних систем відкритого типу слугує ступінь та активність розвитку рослинності.

У межах кожного профілю, де штучний інтелект виявив наявність рову, проводиться подальше вивчення розміченого масиву точкових даних.

Для цього застосовується заздалегідь здійснене розділення точок на категорії «земля» та «зелені насадження».

Визначення стану рівня стоку (канави) базується на підрахунку кількості або насиченості точок, віднесених до категорії «зелені насадження», у межах визначеної просторової ділянки каналу.

До потенційного ареалу захащення рослинністю належать усі точки, які:

- перебувають у горизонтальній проєкції між визначеними на попередній стадії крайніми боковими обрисами каналу;
- знаходяться на висоті, що перевищує підлогу каналу мінімум на 0,15 м.

Такий вертикальний бар'єр дає змогу відсіяти від аналізу як випадково виявлені шуми, так і незначні вибоїни на дні, аби скерувати увагу на ту флору, що справді може мати вплив на гідравлічні характеристики потоку.

Показник густоти рослинності у руслі можна обчислити як співвідношення кількості точок, у яких зафіксовано наявність рослинності, до загальної кількості усіх точок, що потрапили в межі досліджуваної зони русла:

$$I_{veg} = \frac{N_{veg}}{N_{total}}$$

де:

N_{veg} — число позначок об'єктів, ідентифікованих як зелені насадження;

N_{total} — сумарна кількість точок, що потрапляють у межі рову.

Виходячи з присвоєного індексу заростання, можна застосувати таку умовну класифікацію стану:

- Якщо значення $I_{veg} < 0,1$ менше за 0,1, то канава вважається функціональною, з мінімальним рівнем заростання;
- Діапазон $0,1 \leq I_{veg} < 0,3$ вказує на помірне заростання;
- При $I_{veg} \geq 0,3$ констатується суттєве заростання, що несе у собі ризик погіршення гідравлічних показників.

На додаток до експертизи рослинного покриву, здійснюється аналіз ступеня замулення або модифікації конфігурації профілю канави.

Це робиться шляхом зіставлення її актуального поперечного перерізу з еталонною проєктною формою.

Фіксація зменшення проєктної глибини чи ширини може бути індикатором акумуляції донних відкладів або часткової деградації схилів.

Використання такого от методу дає змогу пересунутися від особистої візуальної перевірки до чисельного визначення стану дренажу.

Застосування відомостей, здобутих із LiDAR, надає спроможність планово відстежувати довжелазні фрагменти залізничних шляхів без припинення руху потягів, що є критично значущим при інтенсивному використанні.

Цей спосіб можливо вмонтувати у геоінформаційну систему з метою формування планів стану дренажних ровів та визначення черговості потреб у ремонтно-відновлювальних роботах.

У перерізах, де зафіксовано наявність водостоку (каналу) згідно з алгоритмом, інтенсивність його заростання визначається числом точок, віднесених до категорії рослинності.

При проведенні обчислень беруться до уваги винятково ті точки, що потрапляють у межі встановлених бокових меж водостоку та розташовуються не нижче, ніж на 0,15 м відносно підшви каналу (для наочності, ці точки виділено зеленим кольором на ілюстрації 2).

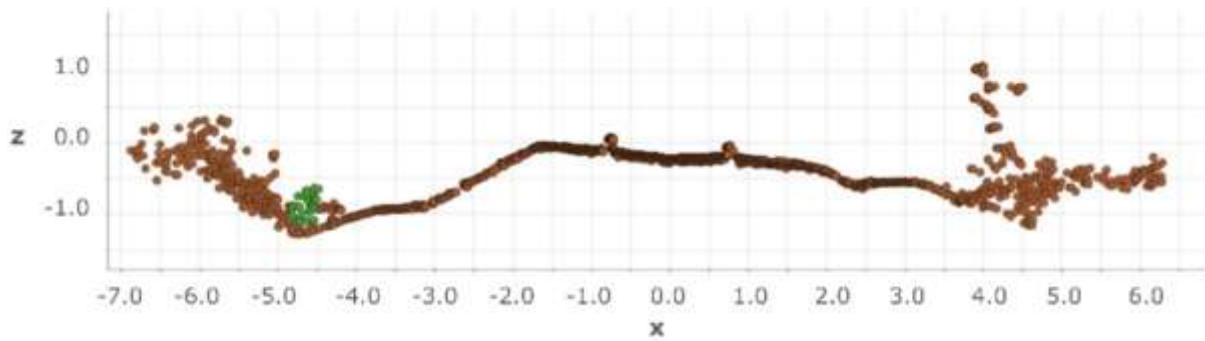


Рисунок 2. Виявлена рослинність у канаві

Окрім власне русла, проводиться очищення навислої зелені, що знаходиться над водовідвідним ровом, але котра не має прямого впливу на його здатність пропускати воду.

Подібні ділянки виключаються з розгляду за допомогою просторового та висотного сортування, що допомагає запобігти завищенню ступеню заростання.

Щоб визначити ступінь нерівностей у самому каналі та вивчити стійкість його поперечного перерізу, виділену зону розбивають на менші блоки, кожен завширшки 5 сантиметрів.

У кожній, окремо взятій, меншій частині аналізу проводиться визначення розходження між запланованою позначкою дна траншеї та реально зафіксованими відмітками рельєфу.

Якщо ці показники значно коливаються, це вказує на нерівномірність поперечного перерізу, причиною чого можуть бути: розмивання ґрунту, його усадка чи, навпаки, нанесення стороннього матеріалу.

Щодо визначення рівня засміченості водовідвідного рову, як додаткову умову беруться до уваги як дані щодо земної поверхні, так і ті, що віднесені до зони з наявною рослинністю.

Подібно до того, як це робиться при вивченні нерівностей, траншея розбивається на менші ділянки по 0,05 м завдовжки.

Проте, на відміну від попереднього методу, тут ми не обчислюємо стандартне відхилення, а натомість знаходимо середній показник різниці у висоті між дном траншеї та точками даних, що їй відповідають.

Ця операція дає нам змогу вирахувати сукупний обсяг накопичених матеріалів чи біомаси.

Дані, отримані з усіх цих малих секцій, зводяться воедино, утворюючи єдиний показник — індекс, що відображає технічний стан траншеї.

Щоб можна було коректно зіставляти між собою різні ділянки, цей індекс обов'язково приводять до загального знаменника, масштабуючи його відносно ширини самої траншеї, чим і створюється коефіцієнт оцінки, виражений у відносних величинах.

Завдяки такій нормалізації вдається запобігти помилковому наданню завищено позитивної оцінки для вузьких траншей, які, попри малий загальний обсяг накопичень (що вигідно для них у чистому вимірі), насправді демонструють більш незадовільний стан.

Схожий підхід застосовується під час дослідження процесу заростання та нерівностей у розмірах, що гарантує єдність у підході до оцінювання.

Особлива пильність приділяється знаходженню зон зі стоячою (нерухомою) водою у руслі канами, адже в переважній більшості ситуацій це є показником збою у функціонуванні системи водовідведення.

Несправна дренажна система здатна спричинити надмірне насичення водою основи дорожнього покриття, зменшення його міцності та швидшу деградацію елементів колійного одягу.

Аби виявити потенційні ділянки із застоєм води, наш метод досліджує проміжки у хмарі точок, що знаходяться всередині канами й мають діаметр орієнтовно від 0,2 до 0,5 метра.

Причина, через яку на таких місцях не фіксується відбитий сигнал, полягає в тому, що водна гладь зазвичай не дає надійного лазерного відбиття назад до приймача, через що у сканованих даних виникають типові "порожнечі".

Запропонована методика дозволяє здійснити всебічний розгляд як топографії, так і робочого стану дренажних систем, і її цілком можливо вбудувати у механізм планового контролю за залізничними об'єктами.

Окрім вивчення поперечного зрізу, цей метод також закликає до дослідження русла у напрямку «вперед-назад».

Причина цього криється в тому, що дієвість системи осушення залежить не лише від конфігурації поперечного перерізу, а й від наявності адекватної поздовжньої схильності, котра гарантує стікання води під дією сили тяжіння.

Щоб визначити величину цього поздовжнього ухилу, проводиться вирівнювання висотних позначок дна каналу уздовж його центральної лінії.

Тут ми виходимо з передумови, що градієнт має приблизно прямолінійну залежність між найвищими та найнижчими точками місцевості, виявленими на шляху.

На підставі просторових даних про підшову прокладається лінія регресії, що слугує наближенням загального спрямування нахилу між фіксованими опорними точками по висоті.

Здобуту регресійну лінію застосовують як еталонний шаблон для проєктного або ж умовно-найкращого (оптимального) профілю рову.

Подальша верифікація здійснюється через дослідження розбіжностей між реальною позицією дна та цією регресійною кривою.

Щоб чисельно визначити ступінь нерівностей і можливих ділянок, де вода може застоюватися, обчислюється стандартне відхилення різниці між фактично заміряними висотами і тією моделлю, яка була апроксимована.

Зростання показника стандартного відхилення вказує на те, що у поздовжньому профілі присутні локальні зниження чи хвилясті нерівності, здатні блокувати безперешкодний стік водних потоків.

Отже, використання регресійного моделювання укупі зі статистичним аналізом розбіжностей дає змогу встановити, наскільки поздовжній профіль відповідає критеріям ефективного водовідведення (рис. 3), а також локалізувати зони, де існує більша ймовірність застою води.

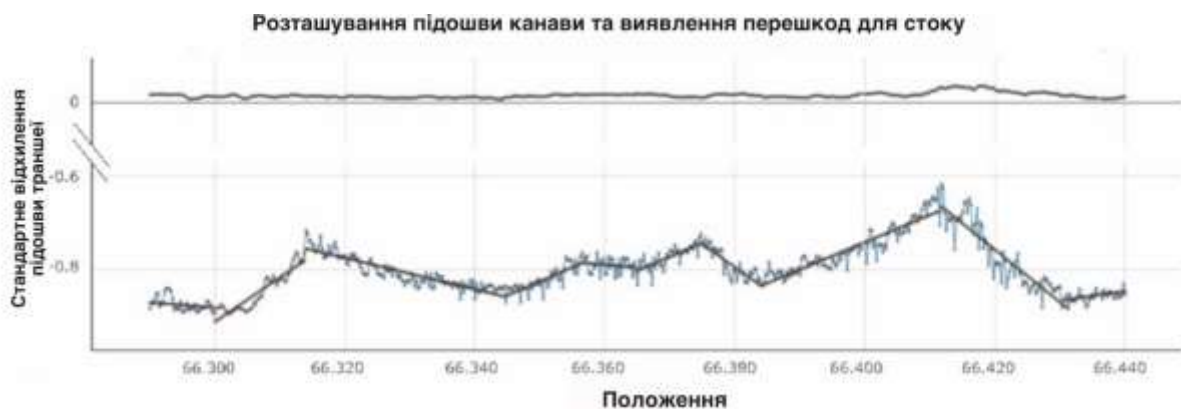


Рис. 3. Розташування підшови каналу та виявлення перешкод для стоку

Разом із цим, встановити найменший допустимий нахил у поздовжньому напрямку у числових значеннях не вдається, адже наявна інформація демонструє лише висотне положення дна каналу стосовно площини рейки.

Звідси випливає, що отримані показники є лише порівняльними і не дають змоги напряму з'ясувати реальний геодезичний ухил у загальноприйнятій системі висот.

Аби ґрунтовно порахувати поздовжній нахил, потрібні додаткові відомості, як-от проєктний чи фактичний ухил залізничного шляху.

Як вихід, можна застосувати геопросторово прив'язані координати, здобуті через GNSS-вимірювання.

Якщо на руках є координати GPS (або ті, що прив'язані до УСК-2000 з висотами у загальнодержавній системі), є можливість встановити абсолютні висоти та вирахувати дійсний позовжній ухил у яру незалежно від орієнтації рейкового полотна.

Отож, аби здійснити перехід від оцінки профілю за відносними показниками до визначення абсолютної характеристики гідравлічної продуктивності, потрібно звести до купи (інтегрувати) дані, отримані від LiDAR, із геодезичним супроводом.

Це дасть змогу належно встановити найменші необхідні ухили та забезпечити контроль за тим, наскільки русла каналів відповідають усім установленим нормам.

3.4 Кореляційний аналіз результатів LiDAR та GPR

Далі, ми плануємо валідувати здобуті результати, порівнюючи їх із незалежними відомостями, отриманими за допомогою георадарного зондування (GPR).

Цей метод дасть змогу визначити ступінь збігу показників, виміряних на основі різних фізичних засад, і тим самим засвідчити, наскільки інформативним є розроблений нами алгоритм.

Оскільки дані георадарного зондування (GPR) вимірюються за порядковою шкалою і можуть включати окремі екстремальні значення, для статистичного визначення зв'язку було обрано коефіцієнт рангової кореляції Спірмена.

Даний підхід не вимагає дотримання нормального розподілу даних та дає змогу досліджувати монотонні співвідношення між змінними, не обмежуючись вимогою лінійності.

Формула для обчислення коефіцієнта Спірмена має вигляд:

$$\rho_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

де:

d_i — різниця між рангами відповідних пар спостережень;
 n — кількість спостережень.

Здебільшого, отримані дані вказують на те, що між показниками стану, визначеними за допомогою LiDAR та GPR, простежується позитивний взаємозв'язок.

Це говорить про те, що геометричні особливості профілю рову узгоджуються з геофізичними показниками, які відображають зміну вологості та структурні трансформації у ґрунті.

Однак, на певних сегментах виявлено як незначні, так і протилежні (негативні) значення коефіцієнта взаємозв'язку (як показано на Рис. 4).



Рисунок 4. Результати кореляційного аналізу між параметрами LiDAR та георадара

Схожі отримані дані можуть мати свої причини, а саме:

- наявність регіональних геологічних відмінностей;
- дія факторів, пов'язаних з рослинним покривом чи перешкодами на поверхні;
- варіативність глибини проникнення зондувального георадара;
- неточності у синхронізованих просторових вимірах.

Також, якщо коефіцієнти узгодженості невеликі, це може вказувати на те, що різні методи реагують неоднаково на процеси, що відбуваються на поверхні землі та безпосередньо під нею.

Зокрема, апаратура LiDAR здатна фіксувати просторові (геометричні) характеристики рельєфу, тоді як георадар (GPR) дає змогу візуалізувати перетворення фізичних характеристик речовин у глибших шарах ґрунту.

Отже, виконаний зіставлявальний аналіз ладитиме узгодженість даних, отриманих обома технологіями, і обґрунтує переваги їхнього спільного використання для нагляду за станом дренажних систем залізничних шляхів.

Переважна частина виявлених кореляційних взаємозв'язків стосується комплектів змінних, куди входить або показник глинистості (який є радше якісною, типологічною ознакою, аніж кількісною, шкальною), або ж показник ширини канами, для якого теоретично передбачається обернена залежність.

А саме, коли ширина канами зростає, може знижуватися схильність до скупчення вологи та забруднюючих речовин, що цілком логічно виражається у негативній кореляції з певними індикаторами деградаційних процесів.

При цьому, варто мати на увазі, що дані георадару (GPR) дають уявлення про фізику нижніх шарів (зокрема, рівень насичення водою, будову, наявність аномалій у матеріалі), тоді як LiDAR фіксує здебільшого форму та розміри земної поверхні.

Хоча у певних місцях ці методики можуть доповнювати одна одну — скажімо, у перезволожених ділянках чи зонах зсувів — вони не є вимірювачами одних і тих самих величин.

Це, почасти, й обумовлює те, чому статистичні зв'язки між ними бувають не надто вираженими чи двозначними.

Обмеження переліку кореляцій, що підлягають аналізу, до тих показників, котрі стосуються спільної фізичної сутності або мають пряму функціональну залежність, здатне підсилити достовірність статистичних висновків.

Відтак, для остаточного підтвердження придатності розробленого методу, варто здійснити подальші вивчення, а саме: збільшити обсяг досліджуваних даних, точніше розмежувати класифікацію характеристик та використати методи багатofакторного опрацювання.

3.5 Дослідження часових рядів

Аби додатково пересвідчитися у вірності здобутих даних, було проведено глибоке дослідження конкретних невеликих відрізків залізничного шляху, застосовуючи часові послідовності вимірювань.

Цей метод дає змогу з'ясувати, наскільки надійно працює алгоритм у різні моменти часу моніторингу, а також відстежити, як змінюється стан дренажних систем.

Під час цієї деталізації виявилось дві властиві риси.

По-перше, обробка інформації, отриманої за допомогою LiDAR, надає зрозумілі та легко пояснювані висновки на тих сегментах, де дренажні рови мають суцільну форму та виразну конфігурацію.

Тим часом, коли йдеться про перерізи з нечіткими або лише частково окресленими контурами (наприклад, якщо є значні заноси мулу чи обвали укосів), то здатність системи автоматично їх розпізнавати знижується.

Суть проблеми в тому, що ті візуальні характеристики форми, які алгоритм сегментації бере до уваги, стають менш виразними.

По-друге, щоб мати змогу коректно зіставляти інформацію, отриману під час різних сесій вимірювання, обов'язковим кроком є їхнє подальше узгодження в часі (пост-синхронізація).

Дані знімаються у різний час, і через це можуть виникати невеликі зсуви у просторовому розташуванні; отже, пряме зіставлення цих профілів без попереднього вирівнювання є неправомірним.

У цій роботі, аналогічно до вже наявних методів синхронізації часових міток, застосовується вирівнювання згідно зі "слідом" (або "підшвою") низовини.

Процес приведення до спільного часу реалізується через знаходження такого зсуву, який дозволяє досягти мінімуму сукупної розбіжності у висотних значеннях між відповідними точками, отриманими у різних проходах вимірювання.

Як орієнтир (еталон) береться останній отриманий масив даних, а всі попередні набори даних підганяються відносно нього.

Це гарантує, що профільні дані будуть узгоджені між собою, що дає змогу досліджувати справжні модифікації, а не артефакти, спричинені неточним розміщенням обладнання.

На зразковому відрізку ґрунту, що сягає приблизно ста тридцяти метрів, розроблений алгоритм безпомилково виявляє цілісну траншею на всю її довжину.

Зниження якості цієї траншеї простежується через наростання поперечних шорсткостей, окремих западин чи формування хвилястості у поперечному зрізі (мал. 5).

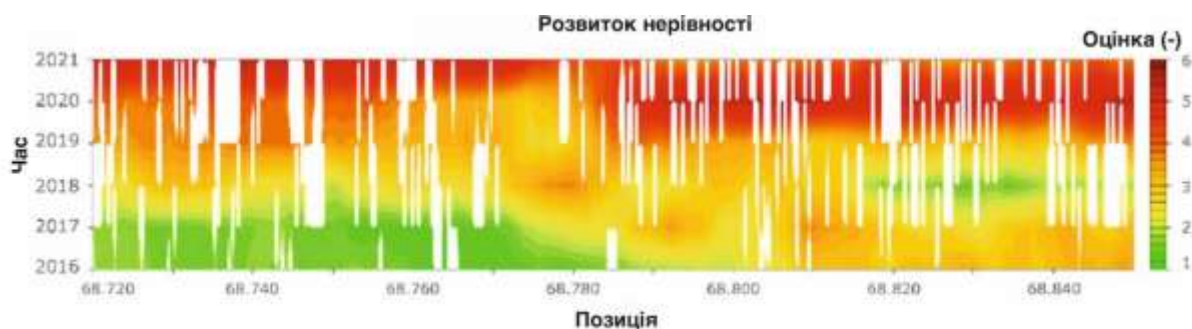


Рисунок 5. Розвиток нерівності на одній з прикладів ділянки

Розгляд цих розбіжностей у часовій перспективі дає змогу окреслити шляхи погіршення стану об'єктів та вказати на ті зони, яким слід надати пріоритет у плані технічного сервісу.

Коли ми комбінуємо аналіз часових послідовностей із надточними вимірами LiDAR, це уможливорює запровадження системи передбачувального контролю, що визнається ключовою складовою у сучасному регулюванні залізничних активів.

Станом на 2016 рік технічний стан канави оцінювався як цілком прийнятний; проте, показники, що характеризують нерівномірність її профілю, демонструють послідовне погіршення динаміки, яке триває аж до 2021 року.

Ця обставина дає підстави припускати, що геометричні характеристики перерізу каналу зазнають поступової деградації, що, своєю чергою, може спричинити зменшення ефективності її функціонування з гідравлічної точки зору.

Дані, здобуті за допомогою LiDAR, разом із висновками, що базуються на них, знаходять своє підтвердження у результатах візуального огляду.

Зображення залізничної ділянки, зроблені у 2016, 2018 та 2021 роках (див. рис. 6), чітко демонструють поступове погіршення стану дренажної канави, що проявляється у зростанні нерівностей та наявності ознак замулення чи заростання рослинністю.



Рисунок 6. Перевірка результатів LiDAR за допомогою зображення

Отже, зведення інструментального вимірювання та фіксації зображень слугує додатковим підтвердженням висновків та легітимізує використаний спосіб визначення стану.

Базуючись на поміченій тенденції до посилення перепадів у морфології шляху протягом 2016–2021 років, цілком імовірно припустити, що стан водостоку надалі погіршуватиметься, якщо не проводити належного технічного догляду.

Продовження розрахункових даних дає змогу передбачити наростання окремих деформацій та зростання ймовірності виникнення ділянок зі скупченням води у майбутні періоди експлуатації.

З огляду на поточний перебіг подій, існує ймовірність подальшого зменшення обсягу рідини, що може пройти через систему, і це, своєю чергою, загрожувє надмірним насиченням водою основи насипу та, як наслідок, прискореним руйнуванням складових елементів надземної частини колії.

Отже, висновки, отримані шляхом дослідження часових послідовностей, можуть слугувати не лише для констатації теперішнього стану речей, а й виконувати функцію прогностичного нагляду, що дасть змогу розробляти вагомі пропозиції щодо визначення термінів превентивних дій та раціоналізації ремонтно-відновлювальних заходів.

Висновок

У цій бакалаврській роботі вивчено потенціал використання технології LiDAR для спостереження за станом дренажних каналів, що є частиною залізничної інфраструктури.

Метою було посилити якість нагляду та оперативно ідентифікувати ознаки руйнування чи зносу.

Зроблений огляд доводить, що необхідно інтегрувати неконтактні, високоточні способи просторового картографування, зважаючи на експоненційне збільшення тиску на залізничні шляхи й водночас обмеженість у проведенні звичних інспекцій.

У рамках здійсненої роботи було вивчено:

- Проведено аналіз наявних методик визначення стану залізничних шляхових систем та окреслено недоліки загальноприйнятих способів;
- Застосовано методику для програмного виявлення дренажних рівнів шляхом дослідження поперечних зрізів точкового масиву;
- Запропоновано спосіб визначення розмірних характеристик рівнів, оцінки їхньої шорсткості, рівня біологічного наростання та замулення.
- Задіяно метод для проаналізування поздовжнього профілю через застосування регресійного наближення;
- Здійснено порівняння кореляційного характеру між вимірами LiDAR та даними ґрунтового радара (GPR), що засвідчило відповідність отриманих значень;
- Виконано вивчення послідовностей даних у часі, завдяки чому стала очевидною тенденція до планомірного зниження якості стану дренажних систем у проміжку від 2016 до 2021 року.

Згідно з отриманими даними, технологія LiDAR демонструє належний рівень точності для визначення габаритів дренажних каналів та ідентифікації ознак їхнього погіршення стану.

Розроблений метод дає змогу автоматизувати аналітичні процедури, трансформуючи процес, який раніше базувався на суб'єктивному візуальному огляді, у строге числове визначення експлуатаційних характеристик.

Ключове значення має здатність фіксувати зміну у часі показника нерівномірності поперечного перерізу, що прямо вказує на поступове зменшення ефективності роботи системи водовідведення з гідравлічної точки зору.

Синтез інформації, отриманої з LiDAR, із візуальними матеріалами та даними, здобутими за допомогою георадарного зондування (GPR), значно підвищує надійність кінцевих результатів і підтверджує перевагу інтегрованої стратегії моніторингових заходів.

Ця праця має практичну цінність завдяки потенціалу впровадження розробленої методології у рутинний процес нагляду за залізничними спорудами.

Це, у свою чергу, надасть змогу:

- Оперативно ідентифікувати ділянки, що потребують уваги;
- Рационалізувати графіки проведення ремонтних заходів;
- Мінімізувати небезпеку надмірного зволоження основи насипу;
- Продовжити експлуатаційний термін компонентів колійної структури.

Отже, використання технології LiDAR закладає фундамент для переходу до цифрового контролю залізничних активів та реалізації підходів проактивного технічного обслуговування.

Список використаної літератури

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.

2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**« Дослідження можливостей застосування LiDAR-технології для
моніторингу стану залізничної колії »**

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)