

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

На правах рукопису

НАМІНАТ ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ

УДК: 528.482+528.8.042

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ГЕОДЕЗИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
МОНІТОРИНГУ ЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ В ЗОНАХ ВПЛИВУ
ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ.**

05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі геодезії в ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Сидоренко Віктор Дмитрович
професор кафедри геодезії ДВНЗ «Криворізький національний університет»

Офіційні опоненти:

- **Глотов Володимир Миколайович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фотограмметрії і геоінформатики Національного університету «Львівська політехніка»
- **Кучер Олег Васильович**, кандидат технічних наук, перший заступник директора з наукової роботи НДІ геодезії і картографії м. Київ.

Захист відбудеться «12» листопада 2020 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, ауд. 502 П навч. корп.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1

Автореферат розісланий «12» жовтня 2020 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.12 к. т. н., доц.



Паляниця Б. Б.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В Україні існує декілька потужних гірничодобувних регіонів з приблизно однаковими проблемами в геодезичному забезпеченні. У Криворізькому залізорудному басейні понад 130 років ведуться розробки як підземним, так і відкритим способами. Розробка підземним способом ведеться на глибині більше ніж 1500 метрів. Внаслідок цього, значна територія міста з сотнями кілометрів автомобільних доріг, по яких за добу проїжджають тисячі одиниць автомобільного транспорту, опинилося в зоні підземних пустот, масового обвалення, хвостосховищ і відвалів. Це у свою чергу призводить до постійної зміни напружено-деформованого стану денної поверхні. Вище зазначене є небезпечним і потребує постійного моніторингу.

Враховуючи те, що гірничі роботи ведуться все ближче до цивільних споруд, інженерних об'єктів міського значення, виникають небезпечні території у межах міста, які потребують постійного контролю для прогнозування їх впливу на фізичну поверхню Землі. Тому сучасна організація моніторингу повинна бути ефективно спланованою, здатною забезпечити достатню точність і оперативність отримання інформації.

Сьогодні наукові розробки в області створення засобів вимірювань на основі лазерно-скануючих систем забезпечують більш якісне вирішення завдань тривимірного моделювання об'єктів. Тому розробка наукового і практичного, обґрунтованого методичного забезпечення моніторингу лінійних об'єктів у зонах впливу підземних гірничих робіт на основі сучасних досягнень в області лазерного сканування є актуальним завданням.

Математичним і методичним аспектам моніторингу інженерних споруд геодезичними методиками присвячена велика кількість наукових робіт. Значний внесок у розробку геодезичних методів, засобів і технологій геодезичного забезпечення інженерних споруд внесли вітчизняні вчені, такі як: Асташенков Г.Г., Брайт П.І., Бурак К.О., Войтенко С.П., Гавриленко Ю.М., Ганьшин В.Н., Денисов А.І., Костецька Я.М., Куліковська О.Є., Левчук Г.П., Міхелев В.Д., Могильний С.Г., Перович Л.М., Піскунов М.Є., Сидоренко В.Д., Третяк К.Р., Черняга П.Г., Чибіряков В. К., Шульц Р.В. та інші.

Розвитку технології лазерного сканування сприяли праці багатьох зарубіжних вчених, таких як: Heipke, Schmidt, Paffenholz, Przybilla, Ryan A. Kromer, Matthew J. Lato, D. Jean Hutchinson, Hao Yang, Xiangyang Xu, Медведєв Е.М., Мельников С.Р., Середович В.А, S. Jaillet, E. Ployon, N. Paparoditis та ін.

Пошук ефективного та якісного вирішення геодезичних завдань на основі автоматизованих і високопродуктивних лазерно-скануючих систем став основним поштовхом представлених досліджень.

Наукова новизна роботи.

До найбільш вагомих результатів, які виносяться на захист, належать такі: встановлено аналітичні залежності похибок визначення положення об'єктів від режимів щільності сканування та відстані до об'єкта; вперше зроблена оцінка параметрів точності створюваних просторових моделей лінійних

інженерних споруд; виконано аналітичне порівняння результатів нівелювання та полігонометрії з результатами наземного лазерного сканування; удосконалено методику моніторингу інженерних лінійних споруд із застосуванням лазерно-скануючих систем; виведено залежності отримуваних даних від кількості станцій, кроку сканування, відстані та кута сканування. Розроблено технологічну схему визначення просідань і моніторингу лінійних споруд.

Наукові положення, що виносяться на захист:

- підтверджено ефективність використання наземного лазерного сканування, для визначення швидкоминучих деформаційних процесів на лінійному об'єкті в зоні впливу підземних гірничих робіт;
- складено технологічний ланцюг виконання вимірювань для визначення форми і деформацій лінійних споруд із застосуванням наземного лазерного сканера;
- опрацьовано методику аналізу й моделювання результатів вимірювань для визначення деформацій лінійних інженерних споруд;
- визначено параметри ведення лазерно-скануючої зйомки, що дозволяють оптимізувати знімальний процес;
- обґрунтовано ефективність використання методики моніторингу деформаційних процесів на прикладі лінійних інженерних споруд.

Мета та завдання досліджень.

Метою дисертаційної роботи є створення методики та удосконалення існуючих методів, що суттєво покращує моніторинг лінійних споруд засобами лазерно-скануючих технологій та просторового моделювання інженерних лінійних споруд на основі даних лазерного наземного сканування.

Основні завдання досліджень:

- оцінити та проаналізувати існуючий досвід лазерно-скануючого знімання та ведення моніторингу;
- обґрунтувати та практично перевірити критерії, що визначають витрати, якість і повноту лазерно-скануючого знімання, моделювання та моніторингу лінійних інженерних споруд;
- удосконалити методи просторового моделювання лінійних інженерних споруд, для подальшого їх використання та ведення моніторингу об'єкта;
- виявити причини похибок та удосконалити методи побудови просторово-цифрових моделей лінійних інженерних споруд;
- дослідити основні технічні параметри сучасних наземних лазерних сканерів;
- дослідити та удосконалити методику геодезичних вимірювань для моніторингу інженерних лінійних споруд;
- апробація запропонованої методики.

Об'єктом дослідження є деформаційні процеси інженерних лінійних споруд в зоні впливу підземних робіт.

Предметом дослідження є методи і технології визначення деформацій інженерних споруд із застосуванням сучасних геодезичних способів. Геодезичний контроль просторових переміщень лінійних інженерних споруд.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у роботі було застосовано сукупність декількох методів. Метод аналізу, що включав аналіз усіх існуючих методик і розробок за питаннями, що досліджувались. Метод формалізації, який представляв собою зведення результатів до графічної форми та ведення порівняння різних методів до кількісних характеристик. Метод експерименту для виявлення кращих характеристик досліджуваної методики. Комп'ютерні технології для моделювання результатів, їх порівняння та обробки даних. Метод порівняння для виявлення кращих показників при дослідженні різних способів вимірювань. Метод абстрагування застосовувався автором при виключенні недостовірних даних з результатів вимірів. Теоретичні методи (найменших квадратів, теорія помилок вимірів) використовувались для обґрунтування оцінки похибок отримуваних просторово-цифрових моделей лінійних споруд. Експериментальні методи (аналіз даних, експериментальні зйомки, модельні дослідження) дозволили розробити рекомендації щодо просторового моделювання лінійних споруд.

Методика досліджень включає в себе використання теорії ймовірностей, обчислювальної математики та статистичного опрацювання результатів вимірювань, теорії помилок вимірювань і прийоми математичного аналізу. Програмні продукти для отримання та опрацювання даних наземного лазерного сканування RISCAN PRO 1.2, CYCLONE 7.0, програмний комплекс MICROSOFT EXCEL 2013, програмне забезпечення Golden Software Surfer 12.0, програмний комплекс AUTOCAD 2012, GeoniCS 10, Credo DAT та Topcon Tools.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати удосконаленої методики та рекомендацій з ведення спостережень, що отримані в дисертаційній роботі використовувались у приватних та державних установах, що підтверджуються актами впровадження. Результати розробок рекомендовані до застосування на практиці службами зсуву підприємств для визначення деформацій інженерних споруд, ведення моніторингу об'єктів. Практичні результати рекомендується до впровадження в навчальний процес.

Автором запропонована методика порівняння TIN-моделей дорожнього одягу автодороги, що дозволило отримувати результати усієї поверхні покриття, а не тільки частин, де закріплені репери профільної лінії.

Встановлено залежності виникнення похибок при використанні наземних скануючих систем, що дозволяє підвищити точність кінцевого результату.

Виконано порівняння даних, що були отримані наземним лазерним сканером та класичними методами - полігонометрією та нівелюванням.

Особистий внесок здобувача.

Основні наукові положення, які становлять зміст дисертації були сформульовані та вирішені автором самостійно. Серед наукових праць, які опубліковані у співавторстві в роботі використані лише ті ідеї, які є результатом його особистої праці. Особистий внесок автора полягає у аналізі сучасних способів зйомок лінійних інженерних споруд для ведення моніторингу та нормативних документів, розроблення методики знімання

наземними скануючими системами, удосконалення методики обробки даних для отримання просторових моделей, встановлення аналітичних залежностей похибок вимірювань наземного сканування.

Апробація матеріалів дисертації

Основні результати наукових досліджень були представлені на наукових семінарах кафедри геодезії ДВНЗ «Криворізький національний університет» (2012-2017 рр.); основні теоретичні й експериментальні результати дисертаційної роботи доповідалися на Міжнародній науково-технічній конференції «Сталий розвиток промисловості та суспільства 2013, 2014», науково-технічній конференції «Форум гірників - 2012» (м. Дніпропетровськ), міжнародній науково-технічній конференції «тиждень гірника 2013» (м. Москва) та інших.

Результати роботи використовувалися для виконання науково-дослідної тематики науково-дослідної частини ДВНЗ «Криворізький національний університет». Дисертаційна робота виконана в межах науково-дослідних робіт: № 9-882-11 Дослідження стану автодороги «Техбаза-кладовище «Західне» і гірського масиву в зоні впливу гірничих робіт методами наземного лазерного сканування та спектрально-сейсмічного профілювання. Авторський нагляд. Термін дії: 06.05.2011-31.07.2014 рр. Замовник: ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; № 9-880-11 Дослідження масиву гірських порід у зоні впливу гірничих робіт шахти «Родіна» методами лазерного сканування і спектрально-сейсмографічного профілювання з метою контролю безпечної експлуатації автодороги «Техбаза-кладовище «Західне». Термін дії: 04.05.2011-30.05.2014. Замовник: ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат». (державний реєстраційний номер 01110005580).

Публікації

З теми дисертації опубліковано 20 наукових статей, котрі затверджені ВАК України, у тому числі одна з яких входить до видання, що індексується міжнародною базою даних Scopus.

Структура та обсяг роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел 16 сторінок (150 найменувань), 2 додатків (14 сторінок). Повний обсяг дисертаційної роботи - 198 сторінок, 76 рисунків, 19 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна постановка питань, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, поставлена мета досліджень, сформульовано задачі досліджень, вказано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів. Наведено основні наукові положення, що виносяться на захист, дані про публікації, апробацію і впровадження розробок і результатів досліджень, наукове та практичне значення роботи.

У першому розділі «Сучасний стан технологій з визначення деформаційних процесів поверхні і надр Землі» виконано аналіз уже існуючих методів з ведення моніторингу наземними лазерними сканерами на

територіях, де ведуться гірничі підземні роботи. Систематизовано знання в області наземного лазерного сканування. Проаналізовано публікації науковців.

Розглянуто основні причини деформацій швидкості (наслідки) та безпосередньо причини деформацій на лінійних об'єктах – автомобільних дорогах. Особливу увагу приділено техногенним факторам у зонах впливу підземних гірничих робіт. У якості факторів техногенного впливу людини виступають переміщення мас гірських порід - виїмка з кар'єрів і підземних розробок та складування розкритих порід і відходів збагачення в відвали. Таким чином, джерелом формування геомеханічних процесів є порушення початкової рівноваги в напруженому стані верхньої частини земної кори внаслідок видобутку корисних копалин. Вторинне поле напруг формується за рахунок утворення виїмок і пустот у гірському масиві і за рахунок порушення ізостатичної рівноваги через переміщення великих обсягів гірських порід, особливо при відкритих розробках. Встановлено 4 основні періоди з експлуатаційними характеристиками автодороги. Виділені основні переваги технології наземного лазерного сканування.

Безперечно, найбільш важливими факторами вибору системи моніторингу об'єкта є комплексний підхід до вирішення проблеми, а також застосування принципів системності, стандартизації, оптимальності, динамічності, наступності, адаптації.

Проте використання лазерних скануючих систем на даний момент у нашій країні ускладнюється через відсутність затвердженої технічної літератури, яка описує різні методики виконання роботи, а також єдиної термінології та класифікації даного виду обладнання. Тому в роботі, провівши аналіз моделей скануючих систем, автором запропонована класифікація в залежності від класу, типу та характеру використання даного пристрою.

На сьогоднішній день в Україні вирішення основних завдань геодезичного моніторингу пов'язане з використанням методик і методів, розроблених і впроваджених у державні стандарти приблизно в період з 1977 по 2000р., відповідно принципи і засоби вимірювання даних методів ґрунтуються на застарілих технологіях. Звідси виникає проблема застосування даної інформації до сучасних засобів вимірювання.

У другому розділі «Характеристики наземних лазерних сканерів, основні помилки при виконанні робіт наземним лазерним сканером» розглянуто основні чинники, які впливають на результати лазерного сканування. Розглянуто методики ведення робіт наземними лазерними сканерами та запропоновано власну для бригади з трьох чоловік. У розділі здійснено огляд принципів виконання робіт для різних наземних лазерних сканерів та визначено узагальнені етапи робіт і послідовність.

Проаналізовано створення робочої планової та висотної основи з використанням різних марок як з різним покриттям (різним коефіцієнтом відбиття), так і різної форми.

Наявність атмосфери на шляху випромінювання призводить до помилок у визначенні відстані. Встановлено залежність показника заломлення від

метеоелементів в умовах, що відрізняються від стандартних (закладені у приладі виробником) з кроком: $\Delta t=10^{\circ}\text{C}$, $\Delta P=10\text{мм рт.ст.}$, $\Delta e=10\%$. Результати представлені на рисунку 1.

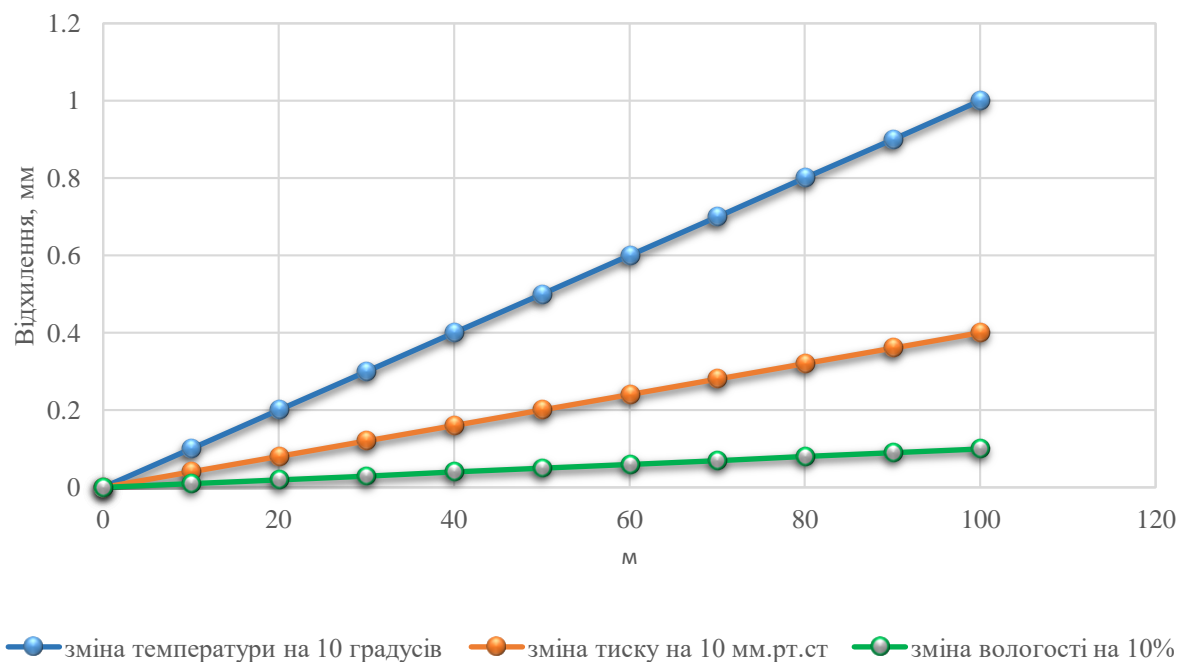


Рис. 1 Вплив змін основних атмосферних явищ

Встановлено, що рефракція електромагнітних хвиль та їх згасання в атмосфері не мають істотного впливу на точність вимірювання відстаней наземними лазерними сканерами при веденні моніторингу лінійних об'єктів.

Проаналізовано вплив форми і матеріалу поверхонь, що впливають на точність вимірювання відстаней. Певні помилки у вимірах будуть присутні при різкій зміні відбивної здатності сканованих поверхонь (рисунок 2).

Для зменшення впливу вищевказаних джерел помилок на точність віддалемірних вимірювань рекомендується дотримуватися наступних рекомендацій: для визначення поправок у вимірюванні відстані необхідно здійснювати облік температури, тиску і вологості повітря (якщо віддалемірний блок наземного лазерного сканера дозволяє здійснювати обчислення і введення таких поправок); при виконанні вимірювань в умовах високої загазованості, турбулентності або градієнтів температур необхідно розробити заходи, що ослабляють дані впливу (наприклад, виконання вимірювань в інший час, при більш сприятливих умовах) або здійснювати їх облік при подальшій обробці вимірювань; при виконанні вимірювань до дзеркальних, напівпрозорих або кристалічних поверхонь необхідно покривати їх матовим матеріалом, а у випадку неможливості цього - вжити додаткових заходів з контролю точності (виконання додаткових вимірювань іншим способом); для досягнення мінімальних розмірів лазерної плями на поверхнях необхідно здійснювати фокусування лазерного променя (при наявності даної опції для наземного лазерного сканера); при опрацюванні даних сканування необхідно враховувати помилкові вимірювання на гранях об'єктів і поверхнях складної форми.

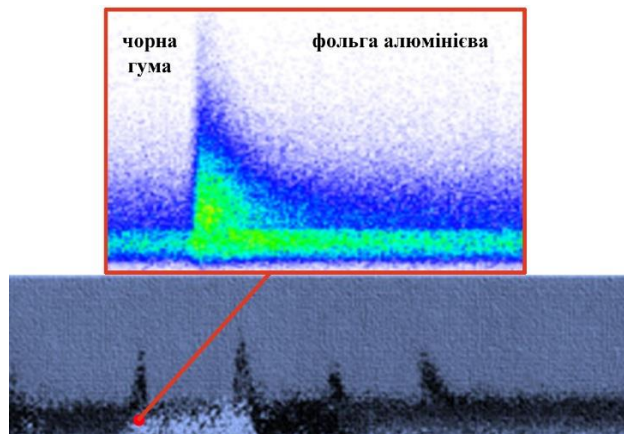


Рис. 2 Сплески на точковій моделі, викликані переходом між поверхнями з різним коефіцієнтом відбиття

Зроблена апріорна оцінка точності результатів наземного лазерного сканування. Встановлено, що в загальній середньо-квадратичній помилці (СКП) положення вимірюваної точки, вплив помилок основного планово-висотного обґрунтування складає близько 50%. При виконанні експериментальних робіт за результатами 33 вимірювань СКП взаємного положення контурів склала близько 12 мм, що підтверджує в цілому і правильність виконаних попередніх розрахунків точності і припущення про співвідношення СКП положення точки і СКП положення об'єкта. Крім того, на точність визначення положення контурів за даними наземного лазерного сканування впливають помилки оператора при векторизації точкової моделі і помилки в вимірюваних відстанях, викликані властивостями поверхонь. При моніторингу лінійних об'єктів встановлено, що віддаль 150 м до знімальних точок є граничною, а рекомендованою є 40-60 м. З урахуванням точності наземних лазерних сканерів і відстаней до об'єктів помилка взаємного положення знімальних точок може становити від 6 до 100 мм. Середня квадратична похибка визначення взаємного положення знімальних точок, отриманих з однієї станції, може становити від 2 до 50 мм. Виходячи з необхідної точності до моніторингу лінійних споруд запропоновані вимоги до технічних характеристик наземних лазерних сканерів.

У розділі зроблено аналіз програмного забезпечення для обробки даних отриманих за допомогою наземних лазерних сканерів, з подальшим розділенням їх по групах і визначенням коефіцієнту функціональності програмного забезпечення для створення цифрових тривимірних моделей лінійних споруд.

У третьому розділі «Розробка методики визначення деформацій лінійних споруд засобами наземного лазерного сканування» розглянуті сучасні методи ведення моніторингу на лінійних спорудах та запропонована методика зйомки лінійних споруд методами наземного лазерного сканування для подальшого моніторингу деформаційних процесів.

У роботі запропоновано визначати кутовий крок сканування, виходячи з вимог до детальності одержуваної точкової моделі. Так на рисунку 3 представлений графік зміни кутового кроку сканування від відстані до об'єкта, що знімається D при лінійному кроці сканування $l = 1$ см.

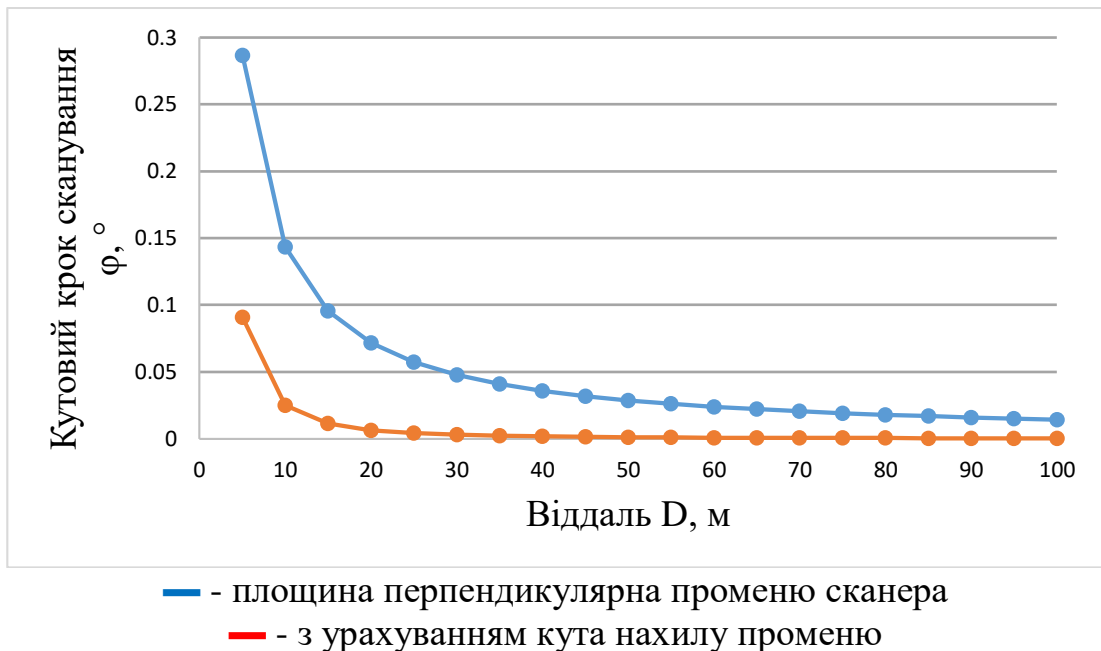


Рис. 3 Зміна кутового кроку сканування від відстані до об'єкта, що знімається.

При великих відстанях необхідно буде зменшувати кутівий крок сканування φ , що призведе до значного збільшення часу роботи на станції і обсягу надлишкових, непотрібних вимірювань. Тому, при зйомці лінійних споруд віддаль до знімання контурів, у середньому, можна прийняти рівним 40-60 м. Однією з умов вибору місць розташування сканерних станцій також є висота НЛС щодо об'єкта. У роботі зроблені розрахунки лінійного кроку сканування l , за результатами яких побудований графік зміни l на площині, перпендикулярній вертикальній осі сканера, залежно від його висоти над об'єктом для $\varphi=0,1^\circ$ і $S=50\text{м}$ (рисунок 4), з якого видно, що установка наземного лазерного сканера в найбільш високі точки збільшує оглядовість і щільність вимірюваних точок, що значно підвищує інформативність точкової моделі.

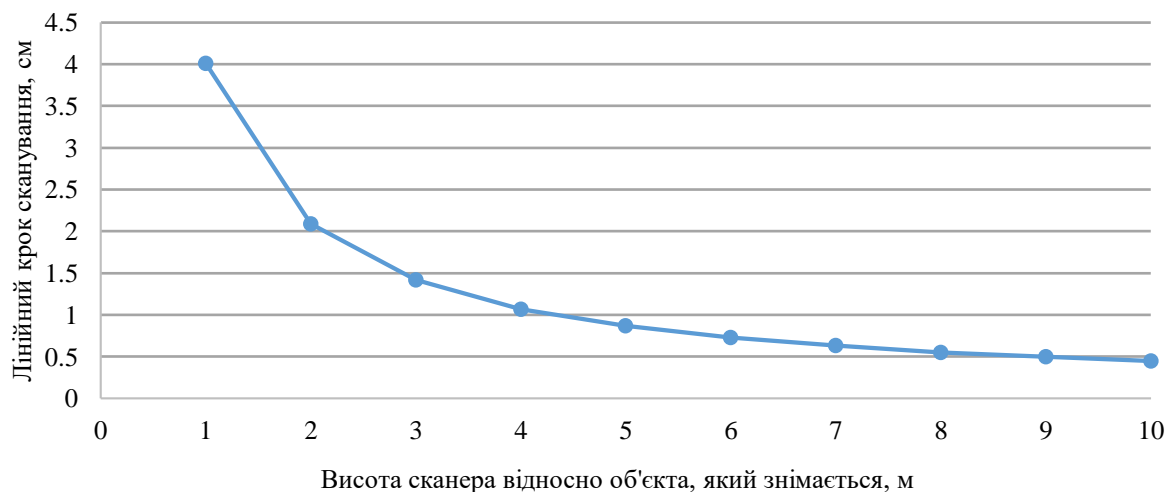


Рис. 4 Зміна l в залежності від висоти сканера, відносно об'єкта, який знімається

Також запропонована методика створення цифрових моделей (ЦМ) за даними наземного лазерного сканування, яка включає декілька етапів. У

роботі розглянутий кожний етап створення ЦМ з детальним описом оптимальних дій, щоб у подальшому використовувати її для моніторингу лінійних споруд. У розділі розглянуто окремо кожен фактор, що впливає на вимірювання наземним лазерним сканером, сукупність цих факторів представлена на рисунку 5.

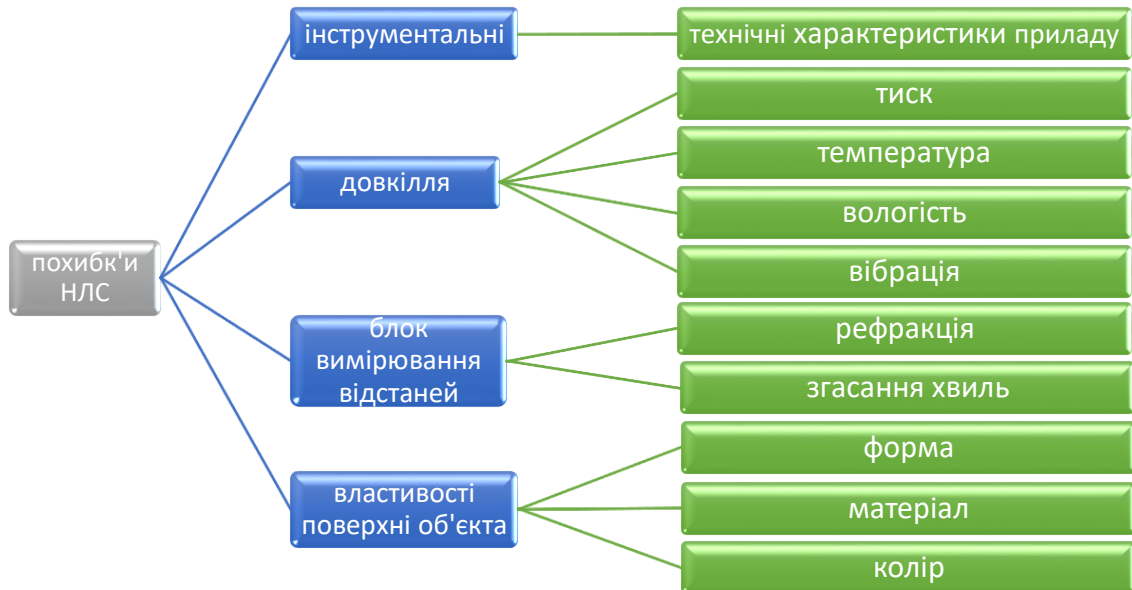


Рис. 5 Схема факторів, які впливають на точність вимірів НЛС

Розроблено методику виявлення помилок осей НЛС, що дозволяє вводити поправки в процесі пост-обробки даних лазерного сканування. Крім того, вплив помилок осей при вимірах зводиться до мінімуму. Так значення, наприклад, для похибки вісі лазера від одного прийому вимірювань відхиляються до $0.00284^\circ(10,2'')$ від середнього значення. Для дослідження точності вимірювання кута проведено польовий експеримент, де марки-відбивачі встановлено по колу від центру стояння сканера під різними кутами. При цьому після зрівнювання точність «еталонного» центру марки становила менше 1 мм для горизонтального положення і висоти. Координати опорних мішеней були використані в якості номінальних значень для подальшого розрахунку. Після чого було проведено кілька сканувань з максимальним кроком сканування роздільної здатності. Отримані в результаті сканувань хмари 3D-точок були використані для подальших обчислень. Полярні координати, такі як кути і відстані, були виведені з декартових координат центру точок марок. Вони були порівнянні з номінальними полярними координатами опорних мішеней для визначення точності системи вимірювання кута, використовуючи формули 1 та 2.

Для розрахунку точності горизонтальних кутових вимірювань:

$$\beta_{i,n} = \arctan\left(\frac{\Delta x_i}{\Delta y_i}\right) - \arctan\left(\frac{\Delta x_n}{\Delta y_n}\right) \quad (1)$$

Вертикальний кут γ_i розраховувався за умови якісного горизонтування сканера:

$$\gamma_i = \arcsin \left(\frac{\Delta z_i}{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}} \right) \quad (2)$$

Кутові похибки, позначені як m_γ і m_b , відповідають середнім значенням абсолютних значень кутових зсувів для кожної опорної цілі і наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Кутові похибки сканера

№ сканування	σ_b , "	σ_γ , "	m_b , "	m_γ , "
1	5,8	3,2	±5,5	±4,0
2	7,3	5,9	±7,4	±5,9
3	6,2	6,8	±5,1	±6,0
4	2,8	5,3	±4,6	±4,5
5	5,9	5,9	±6,1	±5,6
6	6,3	6,3	±6,8	±6,4
7	5,4	5,1	±7,3	±5,7
8	5,9	4,3	±6,2	±6,6
9	6,5	4,5	±7,5	±4,9
10	6,6	5,1	±6,9	±5,8
середнє	5,9	5,2	6,3	5,5

Був виконаний польовий експеримент, де одна й та ж сама марка-мішень сканувалась на різних відстанях з однаковою розподільчою здатністю. Отриманий результат представлений на рисунку 6, який є кореляцію між числом точок і відстанню до сканера. При скануванні використано марку діаметром 15 см.

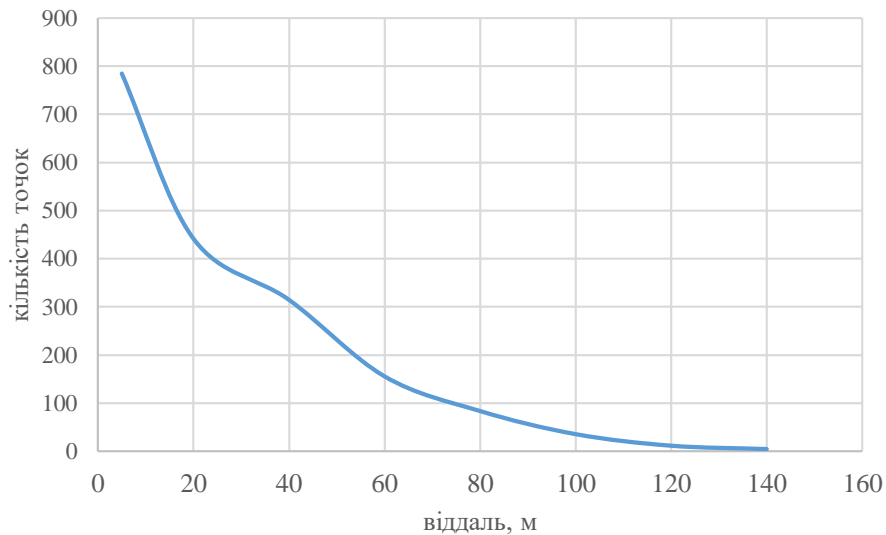


Рис. 6 Залежність кількості точок від відстані

Стандартні відхилення, що були розраховані за відомим діаметром з 3D-хмари точок, відображені на рисунку 7. З рисунку 7 видно, що відхилення значно зростає після 60 метрів і стрімко росте після 110 метрів. Виходячи з цього, рекомендується при точних спостереженнях, таких як визначення деформацій на лінійних спорудах, вести сканування з плечем до 60 метрів.

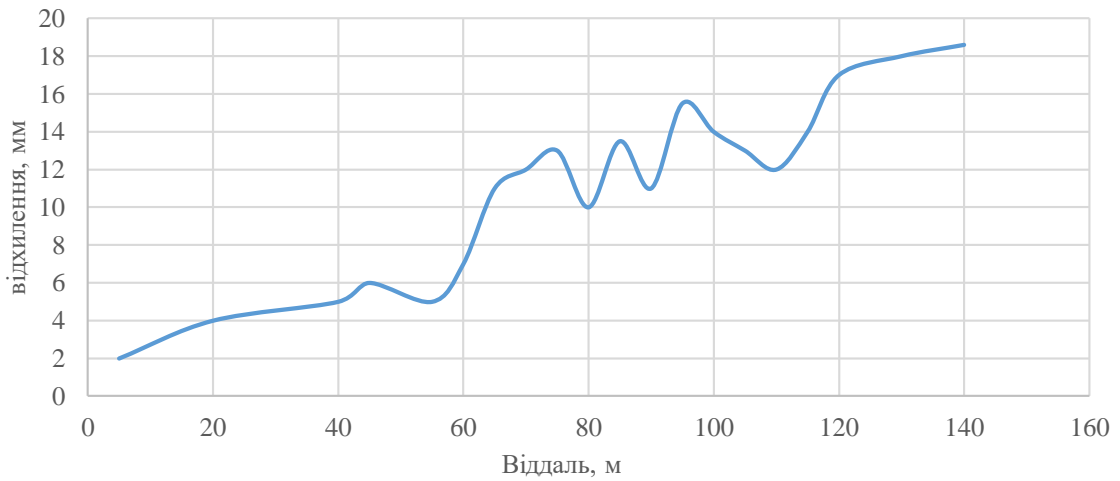


Рис. 7 Стандартне відхилення

У четвертому розділі «Практичне застосування лазерного сканера для визначення деформацій лінійних інженерних споруд та їх подальшого моніторингу» описується практичне застосування наземного лазерного сканера для визначення деформацій полотна автодороги. Наведено результати польових вимірів та зроблена порівняльна характеристика їх з методами нівелювання та полігонометрії.

У розділі розраховано норматив часу на виконання сканерної зйомки для бригади з трьох чоловік та норматив часу на створення єдиної точкової моделі за даними наземного лазерного сканування. Описана геологічна будова району робіт з прив'язуванням профільної лінії до геологічного плану.

Запропоновано методикку застосування НЛС, що дозволяє визначити різні параметри об'єкту, які можна класифікувати за різними ознаками.

Проаналізовано похибки, що виникають при недостатньому прогріві сканера на створеному полігоні. Результати по одній з профільних ліній наведено на рисунку 8.

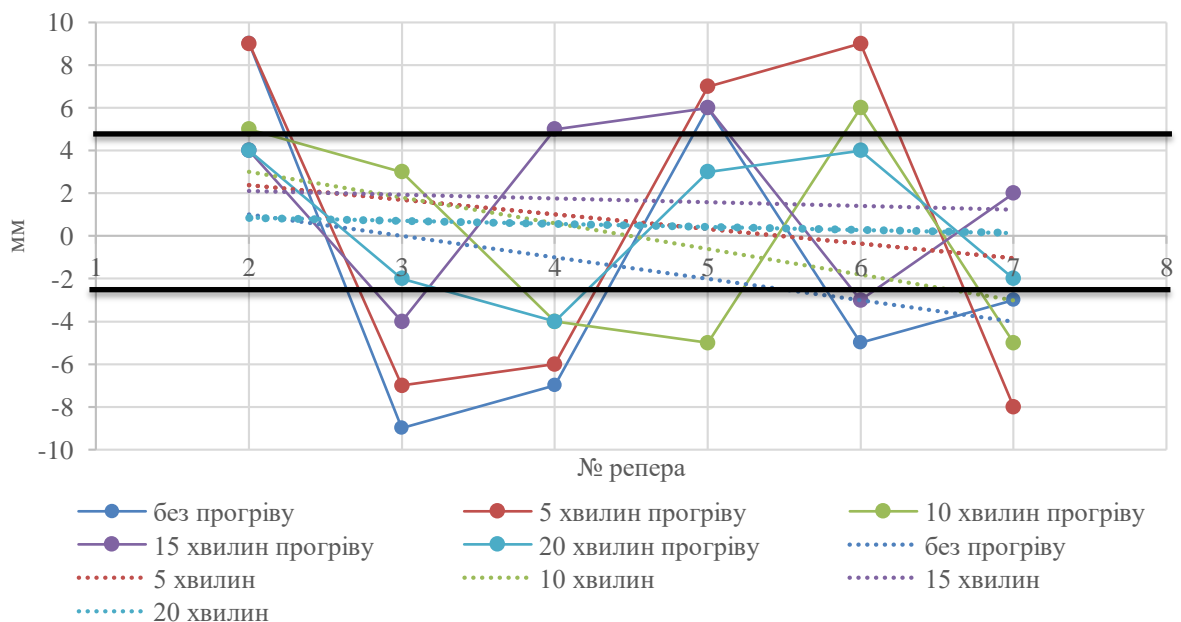


Рис. 8 Зміщення реперів на профільній лінії.

Видно, що після прогріву сканера протягом 15-20 хвилин, лінійна крива по цих показникам стає близькою до горизонтального положення, що свідчить про менший діапазон розходження результатів. Після аналізу даних отримано відхилення координат (рис.9), з якого видно, що різка зміна відхилень координат точок приходить на проміжок 50-60 метрів, і далі з наростанням відстані зростає вже з більшою швидкістю. Велика швидкість зростання помилок спостерігається на проміжку 5-20 метрів.

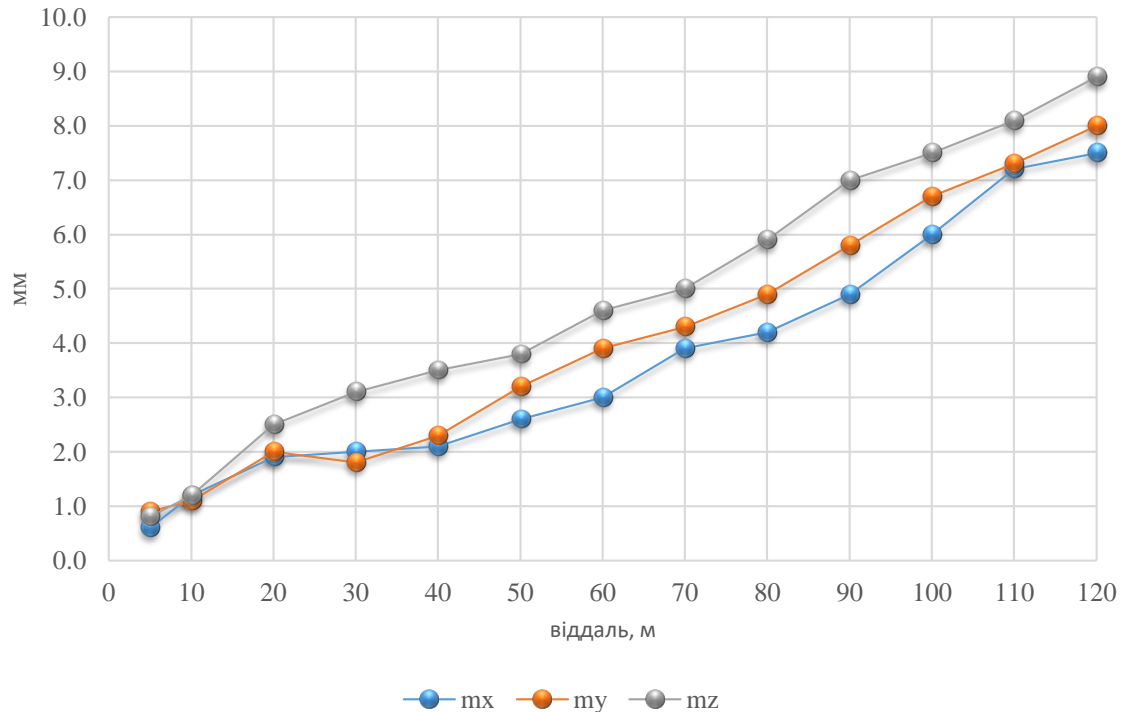


Рис. 9 Відхилення отриманих координат

Для більш точного позиціювання репера при скануванні запропоновано використовувати репер-марки конструкції з відомими розмірами та правильної геометричної форми. На рисунку 10 наведена марка репер кубічної форми. Також дуже добре себе зарекомендувала марка сферичної форми.

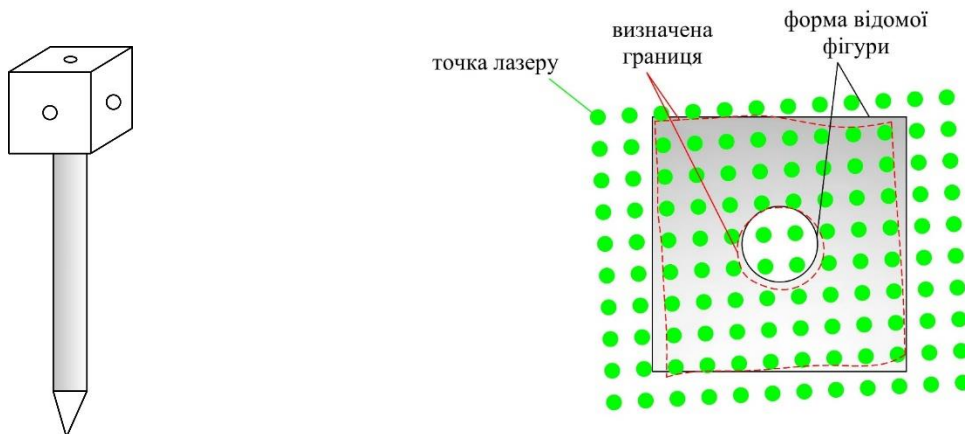


Рис. 10 Марка-репер та її границі сканування.

Об'єкт сканування, на якому виконувались дослідження методики, знаходиться в м. Кривий Ріг Дніпропетровської області. Спостереженням підлягав відрізок полотна автодороги з твердим покриттям (асфальт) довжиною близько 1200м «Техбаза - кладовище «Західне». Полотно ділянки

автодороги пролягає над пустотами, утвореними підземною розробкою рудоносних порід, і межує із зонами обвалів. На рисунку 11 зображено розташування профільної лінії та схему закладки знімальної мережі, яка була прив'язана до пунктів триангуляції державної мережі.

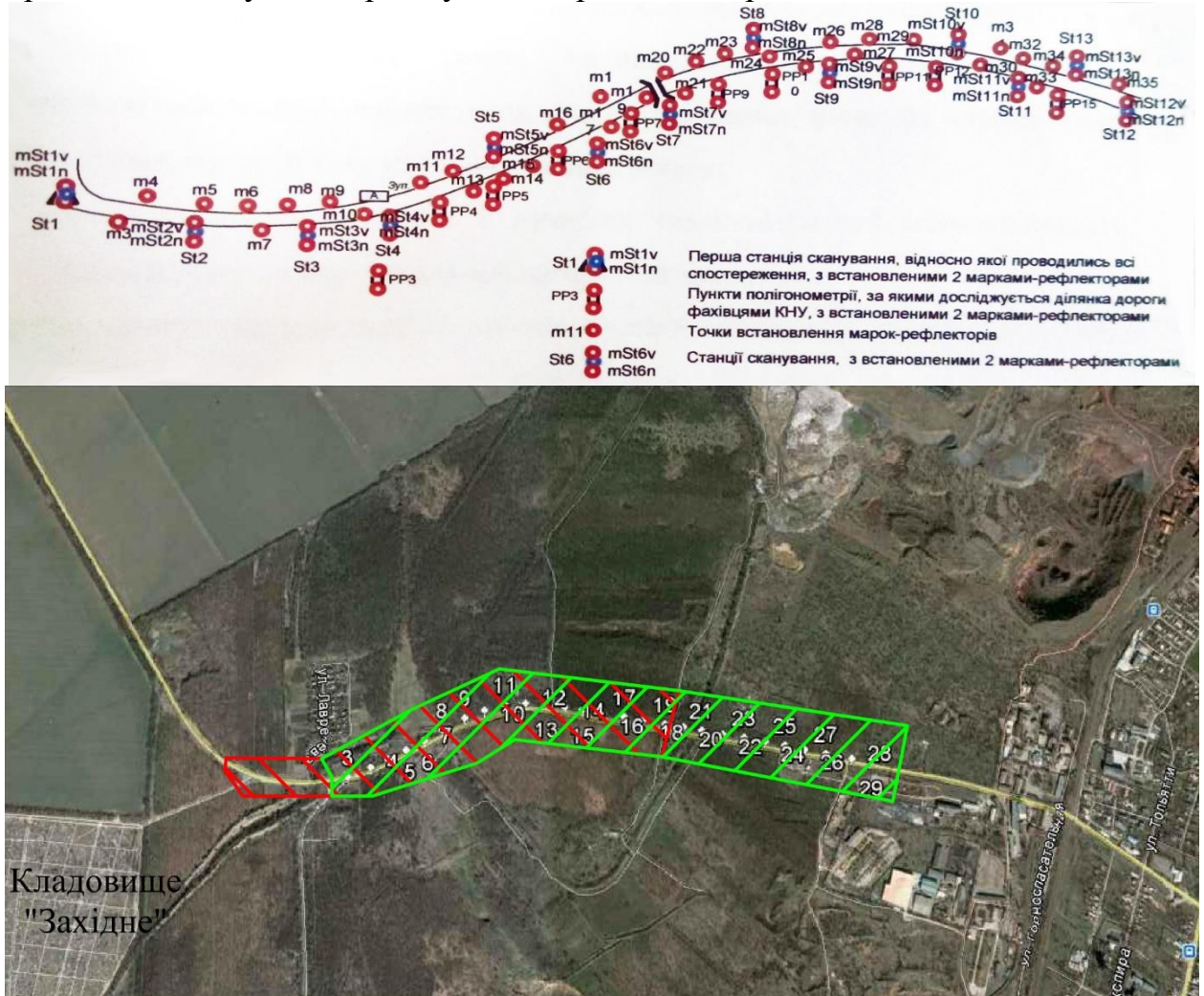


Рис. 11 Схема закладки точок тимчасової знімальної мережі та області ведення робіт на профільній лінії (зеленим кольором – класичні методи, червоним – НЛС)

Для контролю вимірювань НЛС і його нерухомості протягом усього часу роботи визначаються тривимірні координати статичних об'єктів, маркер-реперів довгострокового збереження.

Для виконання лінійно-кутових вимірів на основі даних лазерного сканування пропонується використовувати інструмент «Reference Plane» ПО Cyclone, за допомогою якого задається опорна площина, що відповідає умовам перпендикулярності або колінеарності стосовно осей використовуваної системи координат.

Після процесу сканування автодороги, для зручності було поділено на шість відрізків, на кожен відрізок складено графіки розбіжностей TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини ділянки автодороги. Абрис накладених одна на одну TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини 1-го відрізку наведений на рисунку 12.

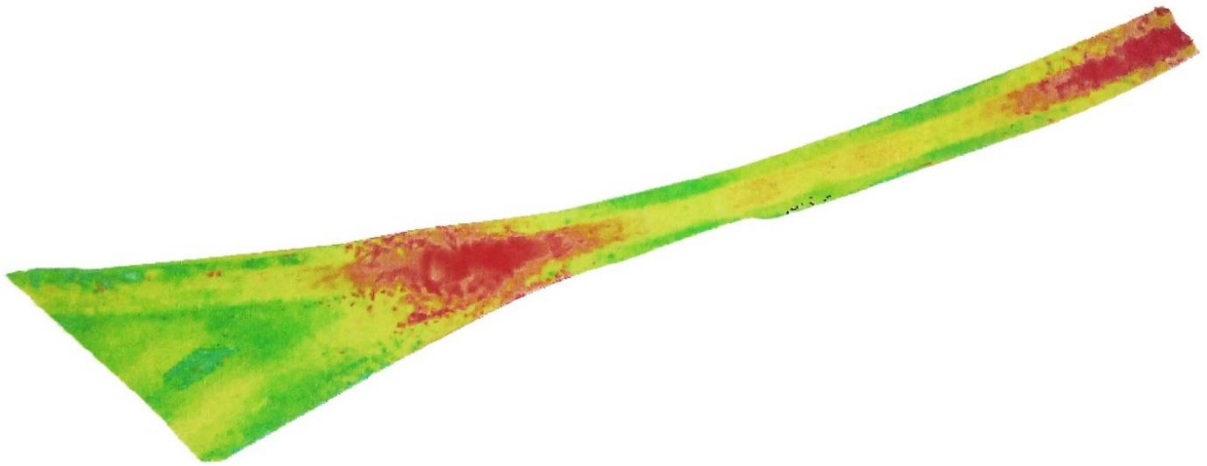


Рис. 12 Абрис накладених TIN-моделей нерегулярної поверхні 1 відрізка

Деформації твердого покриття автодороги в плані на досліджуваній ділянці за період 1 рік не суттєві. Розбіжності TIN-моделей нерегулярної поверхні проїжджої частини ділянки автодороги за полілініями країв й осі твердого покриття з останніх сканувань по осі координат X, Y не перевищують $\pm 0,010$ м, що є в межах точності вимірювань.

По висоті H виявлені деформації твердого покриття автодороги в період 1 року досліджень, які складають:

- на відрізку 1 (0 м - 180 м) в межах від -0,022м до +0,010м;
- на відрізку 2 (180 м - 360 м) в межах від -0,022м до +0,000м;
- на відрізку 3 (360 м - 540 м) в межах від -0,022м до +0,000м;
- на відрізку 4 (540 м - 720 м) в межах від -0,058м до +0,005м;
- на відрізку 5 (720 м - 900 м) в межах від -0,090м до -0,050м;
- на відрізку 6 (900 м - 1080 м) в межах від -0,108м до -0,075м.

Після опрацювання останніх сканувань зроблені наступні висновки.

1. Виявлені вертикальні (по висоті H) деформації твердого покриття і ділянки автодороги в межах від -0,108м до +0,010 м. 2. Деформацій в плані твердого покриття незначні (в межах похибки приладу). 3. Вибрані віддалі між суміжними станціями сканування і крок сканування дозволили отримати координовані точки зі щільністю не гірше 1 точка на $2,5 \text{ дм}^2$ вздовж всієї досліджуваної ділянки.

Для порівняння результатів з даних НЛС створені полілінії країв і центру полотна, які побудовані зі щільністю 3,2 метри см. Таким чином кожна 1/360 частина автодороги проаналізована, що значно перевищує кількість реперів у профільній лінії. Це дає змогу побудувати графіки відхилення по висоті, які представлені на рисунку 13. Графік відображає південну лінію, вздовж якої закріплені репери, для нівелювання, що дає змогу зробити перший аналіз деформацій, визначених різними методами.

Поверхня дороги, що знята за допомогою сканера. Загальна кількість точок при одному зніманні всієї ділянки складає в середньому 1,8 млн точок. На рисунку 14 представлена ділянка дороги, знята під час третього та

четвертого сканування. Згодом побудовані їх моделі по регулярній поверхні та відняті одна від одної.

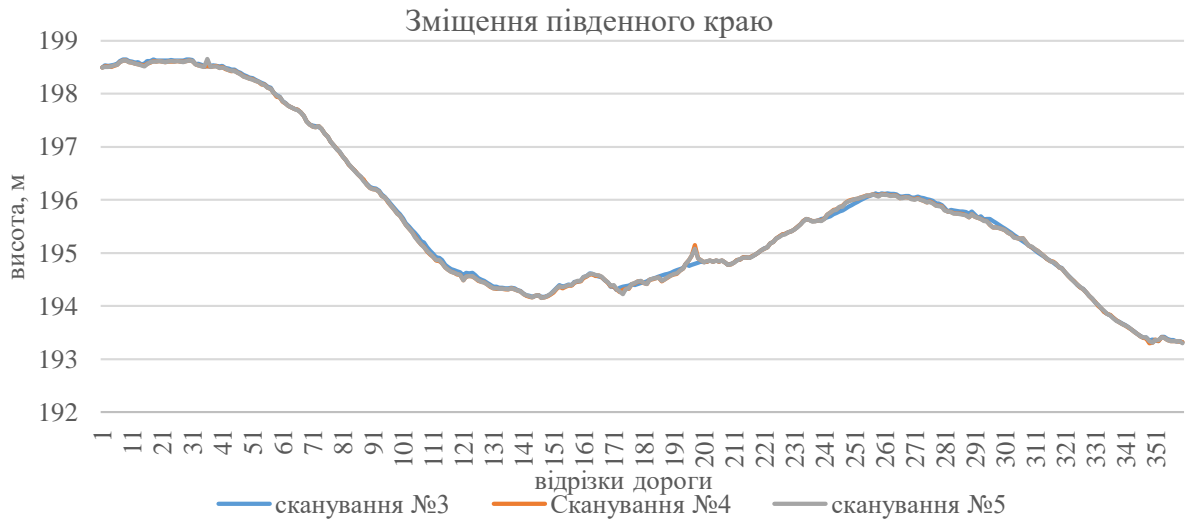


Рис. 13 Графіки зміщення положення південного краю автодороги

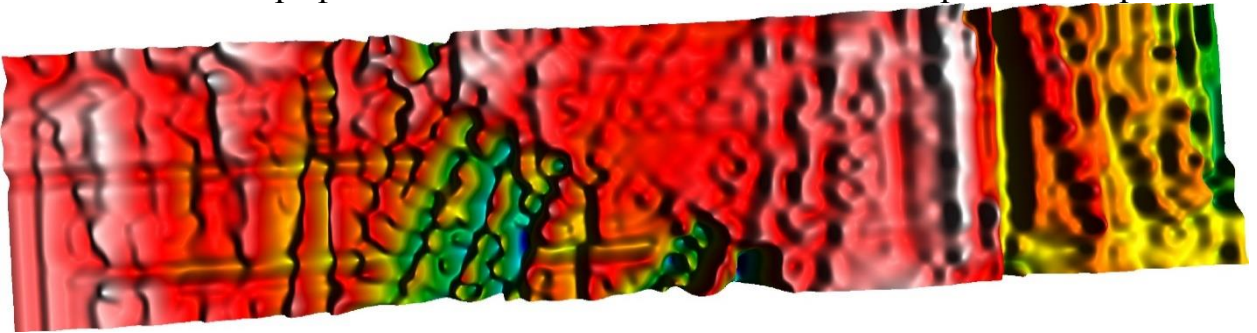


Рис. 14 Віднімання поверхонь, отриманих під час 3 та 4 сканувань

З рисунку чітко проглядаються продовгуваті виїмки, що виникають від великовантажних автомобілів; також можна виявити загальні напрямки та форми просідань покриття дороги.

Порівняльна характеристика НЛС з даними, отриманими під час ведення робіт з нівелювання та полігонометрії, наведена на рисунку 15. Порівняння зроблено на реперах, координати яких визначались спільно під час ведення усіх видів робіт.

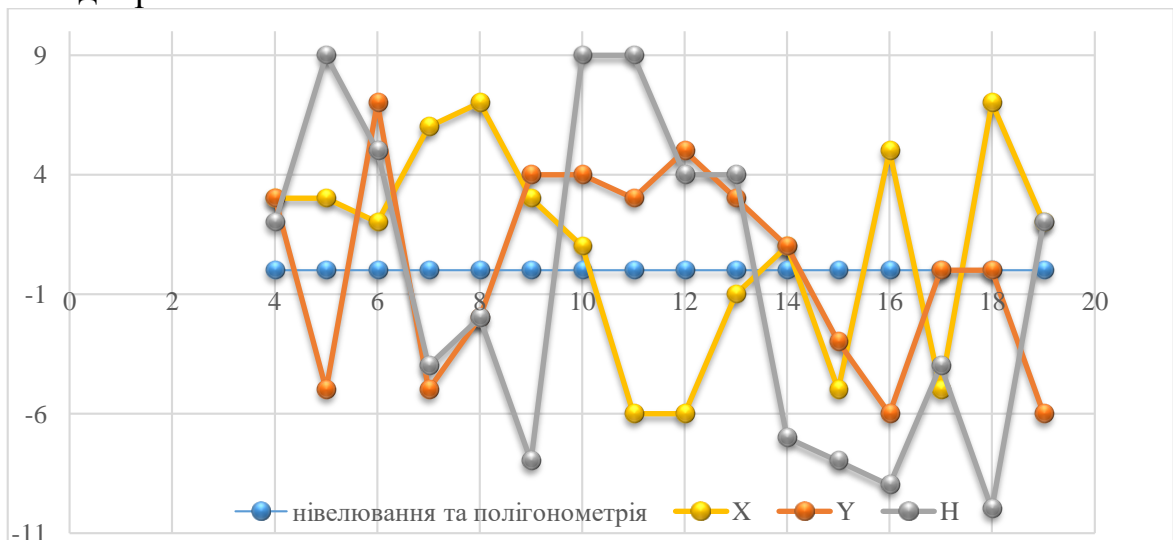


Рис.15 Графіки відхилень, значення в мм

За початок відліку висотних відміток взяті дані нівелювання. Планові координати порівнювались між полігонометрією і наземним скануванням. Отримані координати з полігонометричного ходу взяті за вихідні для подальшого порівняння їх з даними скануванням. Характеристикою точності окремого вимірювання слугує середня квадратична помилка визначення просторового положення кожного репера. Для її знаходження необхідно знати істинні або максимально наближені до них значення. Взавши за істинні значення координати, що отримані з полігонометрії, можна знайти помилки наземного лазерного сканування для одного значення. Порівняння виконано на реперах 4-19, на яких велись спільні спостереження. Результати розрахунки наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Визначення середньоквадратичних помилок

№	відхилення, мм ²			
	ΔX^2	ΔY^2	ΔH^2	ΔS^2
19	4	36	4	43.3
18	49	0	100	3.7
17	25	0	16	18.0
16	25	36	81	2.5
15	25	9	64	24.4
14	1	1	49	2.8
13	1	9	16	0.2
12	36	25	16	3.4
11	36	9	81	23.1
10	1	16	81	1.7
9	9	16	64	0.9
8	49	4	4	7.1
7	36	25	16	23.8
6	4	49	25	55.6
5	9	25	81	31.0
4	9	9	4	18.0
	$m_x=4.5$	$m_y=4.1$	$m_z=6.6$	$m_p=4.0$
	$f_x=-0.001$	$f_y=-0.009$	$f_s=0.009$	$f_{отн}=1/103349$

На рисунку 16 побудовані вектори напрямлень зміщень.

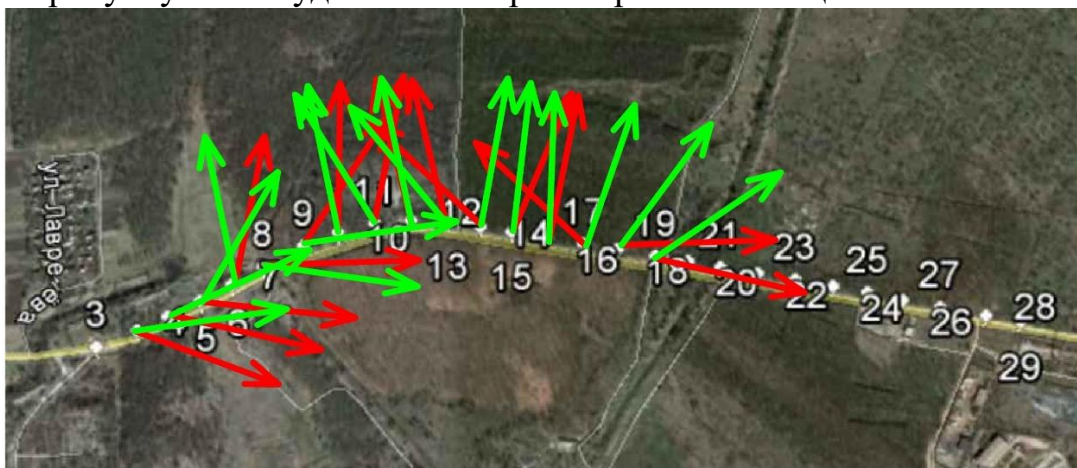


Рис. 16 Вектори напрямлень. (червоний колір - НЛС, зелений – полігонометрія)

Це зроблено для характеристики в цілому отриманих даних, що стосуються планового положення векторів. При аналізі векторів можна

побачити, що напрямлення мають приблизно однаковий напрямок, за винятком репера 5, 6 та 17, 18. Це говорить про однорідність даних, що були отримані різними способами.

ВИСНОВКИ

Результати досліджень показали, що впровадження технології наземного лазерного сканування для вирішення завдання геодезичного контролю в Україні відбувається повільно через відсутність нормативно-технічної документації, що регламентує методику проведення польових і камеральних робіт, а рівень існуючої нормативної документації не відповідає сучасному запиту розвитку геодезичної науки і практики.

Основні результати дисертаційної роботи наступні:

1. Проаналізовано фактори, які найбільше впливають на точність вимірювання відстаней блоком лазерного віддалеміра. Дані рекомендації по зменшенню їхнього впливу.
2. Встановлена залежність точності вимірювання відстані від кута падіння лазерного променя вказує, що максимальний кут розвороту поверхні об'єкта, який сканується, по відношенню до падаючого променя без впливу на точність вимірювання відстаней може досягати 50° . Залежність похибки вимірювання відстані від коефіцієнта відбиття (альbedo) показала збільшення точності на пофарбованих в світлі тони поверхні об'єкта сканування, а також отримано залежність точності вимірювання від шорсткості матеріалу;
3. Проведено детальний аналіз функціональних можливостей програмного забезпечення, як для сканування, так і для обробки даних. Встановлено ряд недоліків та переваг, що дозволяє здійснювати вибір програм в залежності від вирішення необхідних завдань. Перелік програмних комплексів, які порівнювались: Dipsos; RealWorks Survey; Scene Vision 3D; 3D-Extractor; CloudWorx; Cyclone; Faro Scene; VoidWorks; I-Site Studio; Focus Inspection; Focus reverse engineering; RiSCAN PRO; Z+F LFM Modeller; Reconstructor; PolyWorks /Modeller; PolyWorks / Inspector; RapidFormXO; PointCloud; Studio (RainDrop Geomagic);
4. На основі експериментальних досліджень розроблена методика виконання зйомки наземним лазерним сканером лінійних об'єктів, яка за рахунок обрання оптимальних характеристик сканування (відстань до об'єкта, висота установки сканера, крок сканування, кількість марок для зшивання та ін.) дозволяє підвищити продуктивність робіт із застосуванням наземних лазерних сканерів, підвищити достовірність і якість виконаних вимірювань;
5. Удосконалена і досліджена методика створення цифрових моделей на основі даних наземного лазерного сканування, використовуючи хмарини точок. Що в свою чергу сприяло підвищенню точності окремих елементів моделей. Для цього використовувався інструмент «Reference Plane» при камеральній обробці та контрольні марки при скануванні, що запропоновані автором у роботі.

6. Побудована модель дорожнього одягу з двох різних сканувань і зроблено їх порівняння між собою. Так за моделями були виявлені сумарні деформації до 173 мм за рік, а за даними нівелювання і полігонометрії максимальні деформації по профільній лінії склали 27 мм. Це свідчить, що при швидкоминучих деформаціях важлива повнота інформації по всьому об'єкту, яка може досягатися використанням наземним лазерним скануванням.

Запропоновані методики пройшли апробацію, підтверджені актами про впровадження на реальних об'єктах і продемонстрували свою здатність на використання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Намінат О.С. Использование GPS-систем при определении деформаций земной поверхности в горнодобывающих регионах / О. С. Намінат, М. В. Литвиненко. // збірник тез доповідей студентів. – 2008. – С. 15–18.
2. Намінат О. С. Дослідження факторів, які впливають на точність геодезичних GPS-вимірювань при вирішенні маркшейдерсько-геодезичних задач / О. С. Намінат. // Гірничо-металургійний комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку. – 2009. – С. 47.
3. Намінат О. С. Необхідність створення єдиної маркшейдерсько-геодезичної опорної GPS-мережі для якісного моніторингу геодинамічних полігонів / О. С. Намінат. // Гірничо-металургійний комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку. – 2010. – С. 45–46.
4. Naminat O. S. Study of factors affecting the accuracy of geodetic GPS-measurements in solving mine-surveying tasks / O. S. Naminat, V. D. Sidorenko. // "Видавничий дім". – 2010. – С. 137–138.
5. Намінат О.С. Визначення неоднорідностей та порожнеч в гірському масиві методом спектрального сейсмічного профілювання / В. Д. Сидоренко, В. М. Здешиц, О. С. Намінат, М. А. Сорокопуд. // Вісник КТУ: збірник наукових праць. – 2011. – №29. – С. 78–82.
6. Намінат О. С. Наземное лазерное сканирование как метод мониторинга линейных сооружений / О. С. Намінат, А. В. Болотніков. // Сборник трудов научного симпозиума «Неделя горняка-2012» г. Москва. – 2012. – С. 34–37.
7. Намінат О. С. Прогнозирование и оценка состояния устойчивости бортов карьера №4, внешних и временных / О. С. Намінат, Е. А. Несмашний, А. В. Болотніков. // Гірничий вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". – 2012. – №95. – С. 69–74.
8. Намінат О. С. Сегодняшняя необходимость в 3d кадастре / О. С. Намінат. // Наукові аспекти геодезії, землеустрою та інформаційних технологій. Університет новітніх технологій. матеріали II науково-практичної конференції 10-13 червня м. Київ. – 2013. – С. 28–32.
9. Намінат О. С. Геоінформаційні технології наземного лазерного сканування в гірничо-видобувному регіоні / [О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко,

М. В. Шолох та ін.]. // Гірничий вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". – 2013. – №35 – С. 42–46.

10. Намінат О. С. Сучасні технології лазерного сканування в гірничо-видобувному регіоні / [О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко, М. В. Шолох та ін.]. // ДВНЗ «Криворізький національний університет», матеріали конференції сталий розвиток промисловості та суспільства, том 1. – 2013. – С. 44–45.

11. Намінат О.С. Геодезическое обеспечение мониторинга деформационных процессов линейного сооружения в зоне влияния горных работ / О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко, О. Є. Куліковська, В. В. Стеценко. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна. – 2013. – №1. – С. 191–198.

12. Намінат О. С. Особливості камеральної обробки наземного лазерного / [О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко, М. В. Шолох та ін.]. // ДВНЗ «Криворізький національний університет», матеріали конференції сталий розвиток промисловості та суспільства, том 1. – 2013. – С. 47–48.

13. Намінат О. С. Методика зйомки лінійних споруд методом наземного лазерного сканування для подальшого моніторингу / О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, г. Днепропетровск. – 2014. – №6. – С. 83–88.

14. Намінат О. С. Сучасні методи визначення просторового положення об'єктів гірничого відводу / [О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко, М. В. Шолох та ін.]. // Гірничий вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". – 2014. – №97. – С. 34–39.

15. Намінат О. С. Джерела виникнення помилок при отриманні просторових координат точок за допомогою наземного лазерного сканування / О. С. Намінат, В. Д. Сидоренко. // «ГЕОПРОСТІР 2015»: Перша міжнародна науково-технічна конференція: тези доповідей, м.Київ.. – 2015. – С. 26–28.

16. Намінат О. С. Наземне лазерне сканування, як основа складання цифрових топографічних планів / О. С. Намінат, В. В. Бешеvecь. // ДВНЗ «Криворізький національний університет», матеріали конференції сталий розвиток промисловості та суспільства. – 2015. – С. 37.

17. Намінат О. С. Спосіб визначення лінійних елементів зйомки місцевості безпіотною моделлю / О. С. Намінат, О. Є. Куліковська, Ю. Ю. Атаманенко. // Гірничий вісник. м. Кривий Ріг. – 2016. – №101. – С. 41–45.

18. Намінат О. С. Дослідження точносних характеристик наземних лазерних сканерів / О. С. Намінат. // IV міжнародна науково-практична конференція «геоінформаційні технології у територіальному управлінні та експертних дослідженнях». – Збірник наукових матеріалів конференції, м. Одеса. – 2017. – №4. – С. 81–86.

19. Намінат О.С. Аналіз факторів, що впливають на точність результатів вимірювань наземного лазерного сканера / Намінат О.С. // *East European Scientific Journal*, Warsaw. – 2018. - №9 (37). – p. 4-12.

20. Naminat O. A field surveying on the geodetic control of engineering linear structures using a terrestrial laser scanner / Naminat O., Palamar A. // *Geodesy and Cartography*, Vilnius. – 2019. – Volume 45 Issue. – p.49–56.

АНОТАЦІЯ

Намінат О.С. Удосконалення методів геодезичного забезпечення моніторингу лінійних об'єктів у зонах впливу підземних гірничих робіт. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія. – Національний університет „Львівська політехніка” МОН України, Львів, 2020.

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача - розробка методики знімання лінійних об'єктів, що заснована на оптимізації процесу через врахування взаємного розташування сканера та об'єктів зйомки. Використання розробленої методики зменшили похибки визначення місцеположення контрольних точок при скануванні лінійного об'єкту в зонах впливу підземних гірничих робіт.

Виконані дослідження впливу кута нахилу, кольору і типу поверхні, що впливають на точність вимірювання НЛС. Також здійснено вивчення впливу просторової роздільної здатності НЛС і куту нахила лазерного променя НЛС на точність і якість одержуваних результатів.

У роботі запропонована методика визначення помилки візування лазерного променя для подальшого калібрування НЛС. Встановлено оптимальні відстані сканування для подальшого аналізу просторового положення лінійних об'єктів.

Знайдено залежності, які впливають на щільність сканування та величини похибок. Встановлена залежність впливу висоти сканера та відстані на щільність кутового кроку сканування; температури прогріву на точність; зміни лінійного кроку сканування і відстані - на щільність; залежність кількості точок від відстані. Розраховані стандартні відхилення отриманих результатів.

Ключові слова: наземне лазерне сканування, тривимірна модель, деформація, лінійний об'єкт, дорога, цифрова модель, моніторинг.

АНОТАЦІЯ

Намінат А.С. Совершенствование методов геодезического обеспечения мониторинга линейных объектов в зонах влияния подземных горных работ. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 – геодезия, фотограмметрия и картография. – Национальный университет „Львовська політехніка” МОН України, Львов, 2020.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача - разработка методики съёмки линейных объектов, основанная на оптимизации съёмочного процесса за счет учета взаимного расположения сканера и объектов съёмки, использование разработанной методики способствует уменьшению погрешностей при сканировании объекта съёмки.

Выполнены исследования влияния угла наклона, цвета и типа поверхности, влияющие на точность измерения НЛС. Выполнено также исследования влияния пространственного разрешения НЛС и угла наклона лазерного луча НЛС на точность и качество получаемых результатов.

В работе предложена методика определения ошибки визирования лазерного луча для дальнейшей калибровки НЛС, что повысит точность получаемых данных.

Найдены зависимости, которые влияют на плотность сканирования и величины погрешности. Так установлена зависимость влияния высоты сканера и расстояния на плотность, углового шага сканирования и расстояния - на плотность, температуры прогрева - на точность; изменения линейного шага сканирования и расстояния - на плотность; зависимость количества точек от расстояния. Рассчитаны стандартные отклонения полученных результатов.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, трехмерная модель, деформация, линейный объект, дорога, цифровая модель, мониторинг.

ANNOTATION

Naminat A.S. Improvement of methods for surveying monitoring of linear objects in areas exposed to underground mining. - Manuscript.

Dissertation for the degree of PhD, specialty 05.24.01 - geodesy, photogrammetry and cartography. - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2020.

In the dissertation work solved an actual scientific and technical problem - the development of a technique of mapping line features based on the optimization of the shooting process by taking into account the mutual scanner location and subjects, the use of the work developed by the sequence, reducing the error when scanning the subject. The proposed methodology covers all stages of the surveying process, including preliminary analysis, survey and post-processing of the results obtained with the ultimate goal of obtaining a three-dimensional, reliable and informative model of a linear structure. Using the developed models allows to reduce the time of ground-based laser shooting.

The possibility of using terrestrial laser systems for solving the main tasks of mine surveying at linear objects is considered.

The proposed technique for constructing a digital model of a linear structure based on the results of a ground-based laser survey, taking into account all developed recommendations for optimizing the process itself.

Investigations of the influence of the angle of inclination, color and type of the surface, affecting the accuracy of the LLS measurement, are performed. A study was also made of the effect of the spatial resolution of the NLS and the angle of inclination of the laser beam of the NLS on the accuracy and quality of the results obtained.

In this paper, a technique is proposed for determining the error of the sight of the laser beam for further calibration of the LLS, which will improve the accuracy of the data obtained. Optimal shoulders for scanning are determined for further analysis of the spatial position of linear objects.

Dependencies are found that affect the scanning density and the magnitude of the error. Thus, the dependence of the influence of the scanner height and distance on the density, the angular step of the scan and the distance on the density, the heating temperature on the accuracy, changes in the linear step of the scan and the

distance on the density, and the dependence of the number of points on the distance. Standard deviations of the obtained results are calculated.

The implementation of the results will allow us to obtain data not only from the reference line, but also from the whole object, which will significantly increase the areas of detection of the moving processes in the body of the linear object and will allow timely response to the consequences of natural or man-made impacts.

Key words: ground laser scanning, three-dimensional model, deformation, linear object, road, digital model.

Намінат Олександр Сергійович

Удосконалення методів геодезичного забезпечення моніторингу лінійних об'єктів в зонах впливу підземних гірничих робіт.

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

Підписано до друку . .2020

Формат 60x90 1/16

Тираж 100 прим. Зам. №

Друкарня

Свідоцтво

вул.

тел.