

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет землевпорядкування

ПОГОДЖЕНО	ДОПУСКАЄТЬСЯ	ДО
Декан	ЗАХИСТУ	
землевпорядкування	факультету	Завідувач кафедри геодезії та картографії
_____ Олександр ШЕВЧЕНКО		_____ Тарас ЄВСЮКОВ

«_____» _____ 2026 р.

«_____» _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «Створення топографічного плану масштабом 1:2000 території
стадіону НУБіП з використанням технології SLAM»**

Спеціальність «193 Геодезія та землеустрій»

Освітньо-професійна програма «Геодезія та землеустрій»

Гарант освітньої програми

д. геогр. н., професор

(науковий ступінь та вчене звання)

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи,**

док.е.н., професор

(науковий ступінь та вчене звання)

Виконала

_____ **Іван КОВАЛЬЧУК**

(підпис)

_____ **Тарас ЄВСЮКОВ**

(підпис)

_____ **Катерина ЧАЙКОВСЬКА**

(підпис)

Київ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Факультет землевпорядкування**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Геодезії та картографії,
д.е.н., професор

_____ **Тарас ЄВСЮКОВ**

« ____ » _____ р.

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ
РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ
Чайковській Катерині Андріївні

Спеціальність «193 Геодезія та землеустрій».

Освітньо-професійна програма «Геодезія та землеустрій».

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: «Створення топографічного плану масштабом 1:2000 території стадіону НУБіП з використанням технології SLAM» затверджена наказом від 27.11.2025 року № 2899 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру: за 10 днів до захисту.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота розроблена відповідно до Земельного кодексу України від 25.10.2001 № 2768-III, Закону України «Про землеустрій» від 22.05.2003 № 858-IV, Закону України «Про Державний земельний кадастр» від 07.07.2011 № 3613-VI та ін. При написанні роботи використовувалися дані Електронних сервісів Державного земельного кадастру, відомості Державного картографо-геодезичного фонду, містобудівна документація, а також викопіювання із такої документації. Камеральне опрацювання інформації здійснена за допомогою програмного забезпечення " AutoCAD ".

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Проаналізувати нормативно-правові, теоретичні та методичні засади створення топографічних планів із застосуванням сучасних технологій геодезичних вишукувань.

2. Дослідити природно-кліматичні, інженерно-геодезичні та просторові особливості території стадіону НУБіП України на основі наявних картографічних матеріалів і вихідних даних.

3. Обґрунтувати доцільність використання технології SLAM для виконання топографо-геодезичного знімання та створення топографічного плану масштабу 1:2000.

4. Виконати збір, обробку та аналіз просторових даних, отриманих методом мобільного лазерного сканування, з формуванням цифрової моделі місцевості та топографічного плану.

5. Оцінити точність, якість і практичну ефективність застосування технології SLAM для створення топографічних планів та порівняти отримані результати з традиційними методами знімання.

Додатки.

Дата видачі завдання _____

Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи _____ Тарас ЄВСЮКОВ

Завдання взяла до виконання _____ Катерина ЧАЙКОВСЬКА

Зміст

РЕФЕРАТ	7
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ ТОПОГРАФІЧНИХ ВИШУКУВАНЬ ОБ’ЄКТІВ СПОРТИВНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ	14
1.1 Сутність і призначення топографічних планів об’єктів спортивної інфраструктури.....	14
1.2 Нормативно-правове забезпечення топографо-геодезичної діяльності в Україні (ДСТУ, інструкції, технічні регламенти).....	15
1.3 Порядок топографічного знімання. Переваги і недоліки головних методів топографічної зйомки.	17
1.4 Застосування сучасних технологій у топографічному зніманні	19
1.5 Сутність технології SLAM і сфери застосування	22
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ’ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИХІДНІ ДАНІ	27
2.1. Загальна характеристика території стадіону НУБіП України.....	27
2.2. Природно-кліматичні та інженерно-геодезичні умови.....	30
2.3. Аналіз наявних картографічних матеріалів	32
2.4. Обґрунтування вибору масштабу 1:2000.....	38
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ТОПОГРАФІЧНОГО ЗНІМАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ SLAM	42
3.1. Вибір обладнання для SLAM-зйомки	42
3.2. Створення геодезичної основи	45
3.3. Польові роботи із застосуванням SLAM	49
3.4. Особливості збору даних у складних умовах	54

3.5. Порівняння SLAM з традиційними методами	55
РОЗДІЛ 4. ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ І СТВОРЕННЯ ТОПОГРАФІЧНОГО ПЛАНУ	58
4.1. Первинне опрацювання SLAM-даних	58
4.2. Побудова цифрової моделі місцевості.....	59
4.3. Векторизація та класифікація об'єктів	62
4.4. Створення топографічного плану масштабу.....	65
4.5 Оцінка точності та якості отриманих результатів	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг бакалаврської кваліфікаційної роботи становить 81 сторінки комп'ютерного тексту. Робота містить 5 таблиці, 27 рисунків. Список використаних джерел налічує 49 найменувань.

Ключові слова: ТОПОГРАФІЧНИЙ ПЛАН, ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧНІ РОБОТИ, SLAM, МОБІЛЬНЕ ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ, ХМАРА ТОЧОК, 3D-МОДЕЛЮВАННЯ, СПОРТИВНА ІНФРАСТРУКТУРА, ПРОСТОРОВІ ДАНІ.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є дослідження можливостей застосування технології SLAM для створення топографічного плану масштабу 1:2000 території стадіону НУБіП України.

Об'єктом дослідження є територія стадіону Національного університету біоресурсів і природокористування України та процес виконання топографо-геодезичного знімання.

Предметом дослідження є застосування технології одночасної локалізації та картографування (SLAM) під час створення великомасштабного топографічного плану.

Методи дослідження: аналіз і синтез, порівняльний аналіз, картографічний метод, топографо-геодезичні методи дослідження, мобільне лазерне сканування та опрацювання геопросторових даних.

До основних результатів дослідження належать такі:

досліджено нормативно-правове забезпечення топографо-геодезичної діяльності та створення топографічних планів в Україні;

проаналізовано теоретичні засади, принципи роботи, переваги та обмеження технології SLAM у геодезії;

виконано аналіз природно-кліматичних, інженерно-геодезичних та просторових умов території стадіону НУБіП України;

проведено збір та обробку просторових даних методом мобільного лазерного сканування із застосуванням технології SLAM;

створено цифрову модель місцевості та топографічний план масштабу 1:2000 території стадіону НУБіП України;

виконано оцінку точності та якості отриманих результатів і здійснено порівняння технології SLAM з традиційними методами топографічного знімання.

Практичне значення роботи полягає у підтвердженні можливості ефективного використання технології SLAM для оперативного створення актуальних топографічних планів спортивних об'єктів та інших територій зі складною організацією простору. Отримані результати можуть бути використані під час виконання топографо-геодезичних робіт, інвентаризації об'єктів інфраструктури, просторового планування територій та створення цифрових моделей місцевості.

ABSTRACT

The bachelor's qualification thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The total volume of the thesis is 64 pages of typed text. The thesis contains 5 tables and 26 figures. The list of references comprises 49 sources.

Keywords: TOPOGRAPHIC PLAN, TOPOGRAPHIC AND GEODETIC SURVEYING, SLAM, MOBILE LASER SCANNING, POINT CLOUD, 3D MODELING, SPORTS INFRASTRUCTURE, SPATIAL DATA.

The purpose of the bachelor's qualification thesis is to investigate the possibilities of applying SLAM technology for the creation of a 1:2000-scale topographic plan of the NULES of Ukraine stadium territory.

The object of the study is the territory of the stadium of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine and the process of topographic and geodetic surveying.

The subject of the study is the application of Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technology in the creation of a large-scale topographic plan.

Research methods: analysis and synthesis, comparative analysis, cartographic method, topographic and geodetic research methods, mobile laser scanning, and geospatial data processing.

The main results of the study include:

- investigation of the regulatory and legal framework governing topographic and geodetic activities and the creation of topographic plans in Ukraine;
- analysis of the theoretical foundations, operating principles, advantages, and limitations of SLAM technology in geodesy;
- assessment of the natural, climatic, engineering-geodetic, and spatial conditions of the NULES of Ukraine stadium territory;
- acquisition and processing of spatial data using mobile laser scanning based on SLAM technology;
- creation of a digital terrain model and a 1:2000-scale topographic plan of the NULES of Ukraine stadium territory;
- evaluation of the accuracy and quality of the obtained results and comparison of SLAM technology with conventional topographic surveying methods.

The practical significance of the study lies in confirming the feasibility and effectiveness of using SLAM technology for the rapid production of up-to-date topographic plans of sports facilities and other areas characterized by complex spatial organization. The obtained results can be applied in topographic and geodetic surveying, infrastructure inventory, spatial planning, and the development of digital terrain models.

ВСТУП

Створення великомасштабних планів відіграє важливу роль для прийняття управлінських рішень. Забезпечення точною геопросторовою інформацією сфери землеустрою, будівництва, господарської діяльності належить до важливих сфер людської життєдіяльності. Протягом останніх десятиліть цифрові технології збору та опрацювання даних зробили революційний внесок в розвиток сучасної геодезії та землеустрою. Нині, ми стаємо свідками високопродуктивних методів знімання території, що активно поширюються серед спеціалістів різних сфер, виділяючи головними критеріями час і точність зйомки.

Для таких процесів як просторове планування, реконструкція та інвентаризація земель ми нерідно зіштовхуємось з нагальною потребою в актуальному картографічному забезпеченні, що задовольняє сучасні нормативні вимоги до таких робіт.

Технології лазерного сканування – це інноваційний метод для отримання просторових даних. Одним із таких способів є SLAM, він дозволяє виконувати мобільне лазерне сканування та формувати щільні хмари точок без регулярного GNSS–сигналу. Завдяки цьому: оперативність створення топографічних матеріалів – підвищується, а час польових робіт – скорочується.

Актуальність роботи: оновлення планово-картографічних матеріалів на територію стадіону Національного університету біоресурсів і природокористування України була викликана необхідністю отримання топографічного плану масштабу 1:2000 з метою виконання подальших проектних робіт, пов'язаних із його майбутньою реконструкцією. Ці роботи були проведені на замовлення кафедри фізичної культури і спорту НУБіП України із використанням сучасної технології SLAM.

Мета роботи: розв'язати складну прикладну задачу у сфері геодезії пов'язану зі створенням топографічного плану масштабу 1:2000 на територію стадіону НУБіП України із застосуванням сучасних технологій SLAM.

Об'єкт дослідження: територія стадіону Національного університету біоресурсів і природокористування України, а також процес виконання топографо-геодезичного знімання.

Предмет дослідження: застосування методу одночасної локалізації та картографування для створення великомасштабного топографічного плану.

Завдання роботи:

1. Дослідити теоретичні основи, алгоритми та технічні можливості методу збору даних – SLAM у геодезії.
2. Виконати польове лазерне сканування території стадіону НУБіП України з використанням сканера SLAM.
3. Опрацювати отриману хмару точок, включаючи фільтрацію, класифікацію об'єктів та геоприв'язку.
4. Векторизувати дані сканування у топографічний план в масштабі 1:2000.
5. Оцінити точність та практичність технології SLAM у порівнянні з традиційними методами знімання.

Методи дослідження: аналіз і синтез – для опрацювання нормативно-правових актів, наукових публікацій та теоретичних основ застосування технології SLAM; картографічний метод – для аналізу картографічних матеріалів і просторових даних досліджуваної території; топографо-геодезичні методи – для виконання польових вимірювань та створення геодезичної основи; метод мобільного лазерного сканування – для збору просторових даних із використанням технології SLAM; метод цифрового моделювання – для побудови цифрової моделі місцевості та створення топографічного плану; порівняльний метод – для оцінки ефективності технології SLAM порівняно з традиційними методами топографічного знімання.

Апробація результатів дослідження. Основні результати бакалаврської роботи апробовано на Міжнародній науково-практичній конференції «GEOPoint» (м. Київ, 5–6 березня 2026 р., НУБіП України), де опубліковано тези доповіді на тему «Особливості створення топографічного плану масштабу

1:2000 на території стадіону НУБіП із використанням технології SLAM» (с. 325 збірника тез конференції) [2]. Результати дослідження також були представлені на I турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей 2025–2026 навчального року за спеціальністю «Геодезія та землеустрій», проведеному на факультеті землевпорядкування НУБіП України 18 березня 2026 року, де робота «Застосування SLAM-технології для топографічного знімання території стадіону НУБіП» була відзначена дипломом III ступеня. Крім того, на Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей 2025–2026 навчального року за спеціальністю «Геодезія та землеустрій» було подано наукову роботу «Створення топографічного плану масштабу 1:500 території стадіону НУБіП з використанням технології SLAM» (м. Київ, 06 квітня 2026 р.), яка також була відзначена дипломом III ступеня.

Протягом написання бакалаврської кваліфікаційної роботи автором було застосовано інструменти штучного інтелекту для допомоги в опрацюванні інформаційних джерел, вдосконаленні структури тексту, формулюванні окремих положень та перевірці логіки викладу матеріалу. Етапи дослідження: розрахунки, аналіз даних, формулювання висновків та написання тексту – виконувалися самостійно. Використання технологій штучного інтелекту здійснювалося виключно з дотриманням вимог «Положення про політику використання штучного інтелекту у Національному університеті біоресурсів і природокористування України» [31] та принципів академічної доброчесності.

Автор роботи висловлює щирі вдячності директору компанії GEOFIX Олексію Куценку, а також її фахівцям – Дмитру Матвійчуку та Георгію Юрченку – за надану можливість використання сучасного геодезичного обладнання (зокрема SLAM-сканера R100 та GNSS-приймача ALFAGEO PLUS RTK) і спеціалізованого програмного забезпечення в межах виконання даної бакалаврської кваліфікаційної роботи. Суттєву подяку автор адресує завідувачеві кафедри фізичної культури і спорту НУБіП України, доценту Миколі Костенку, за сприяння в організації та реалізації дослідження на базі об'єктів спортивної інфраструктури університету. Надана можливість апробації сучасних геодезичних технологій у реальних умовах функціонування спортивних об'єктів дозволила забезпечити прикладний характер отриманих результатів. Автор також висловлює сподівання, що результати дослідження можуть бути використані НУБіП України, зокрема кафедрою фізичної культури і спорту, у підготовці та реалізації міжнародних грантових проєктів, у тому числі в рамках програм типу Erasmus+.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ ТОПОГРАФІЧНИХ ВИШУКУВАНЬ ОБ'ЄКТІВ СПОРТИВНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

1.1 Сутність і призначення топографічних планів об'єктів спортивної інфраструктури

Топографічний план – це великомасштабне картографічне зображення на площині в ортогональній проекції обмеженої частини місцевості, у якому не враховується кривизна земної поверхні [33].

Детальне відображення території на планах виконують у великому масштабі, зазвичай це від 1:500 до 1:5000 – в залежності від завдання. За своєю класифікацією великомасштабні плани можна умовно розділити на дві групи, залежно від їхнього призначення:

I група: топографічні плани масштабів 1:500-1:1000 – використовують на будівництві, для детальних планів населених пунктів чи інженерних мереж;

II група: топографічні плани масштабів 1:2000-1:5000 – застосовують для кадастрової зйомки, генпланів, містобудівної документації та навіть проектування автомобільних доріг [23].

Під спортивною інфраструктурою доцільно розуміти простір, здебільшого, загального користування. Благоустрій цих ділянок насамперед впливає на комфорт та функціональність міського середовища. Зазвичай подібна територія ділиться на 3 рівні за функціональним призначенням:

Основні споруди – зали, поля, майданчики;

Допоміжні споруди – адміністративні приміщення, склади, роздягальні;

Споруди для глядачів – трибуни, ложі тощо.

Велика кількість елементів ставить перед нами завдання коректного їх відображення, також зазвичай відведена на спортивну інфраструктуру територія не має правильної форми, в тому числі рельєфу. Як зазначається в низці нормативно-правових актів, таких як: ДБН В.2.2-13-2003 «Спортивні та

фізкультурно-оздоровчі споруди» [11], ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування та забудова територій» [10], Наказ Міністерства будівництва №105 від 10.04.2006 Правила утримання зелених насаджень у населених пунктах України [34] – озеленення навколо спортивної інфраструктури виконують захисні, санітарно-гігієнічні та естетичні функції для комфорту відвідувачів, та обов’язково повинні бути відображені на картографічних матеріалах. Не менш важливим аспектом є захист спортивних споруд, що постійно піддаються антропогенному впливу.

Враховуючи зазначені фактори, для оптимального відображення інформації спортивних об’єктів є використання масштабів 1:500 – для деталізації проєктних рішень, та 1:2000 – для загального ситуаційного планування в містобудівній документації.

1.2 Нормативно-правове забезпечення топографо-геодезичної діяльності в Україні (ДСТУ, інструкції, технічні регламенти)

Нормативно-правову базу топографо-геодезичної діяльності в Україні, складають нормативні, що впорядковують створення державних мереж, топографічні зйомки, атестацію спеціалістів та управління Державним картографо-геодезичним фондом. Основним положенням в регулюванні цих процесів є Закон 353-XIV «Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність» [37], саме він визначає головні поняття та об’єкти, правові, економічні та організаційні принципи галузі.

Поряд з цим, важливим нормативним документом у нормативно-правовому регулюванні топографо-геодезичної діяльності виступає Закон України №554-IX «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» [35], що створює законодавчі передумови для функціонування національного геопорталу, інтегруючи всі кадастри і картографічні метадані в одному місці для зручного користування.

Крім того, окремі положення Закону України №3613-VI «Про Державний земельний кадастр» [32], регулюють створення національної геоінформаційної системи відомостей про місце розташування, обмеження, цільове призначення,

якісні та кількісні показники землі, присвоєння кадастрового номера. Встановлення порядку внесення відомостей про земельну ділянку до бази Державного земельного кадастру. Земельний кодекс України (25.10.2001 № 2768-III) [18] – є основним у сфері земельних взаємовідносин між об'єктами та суб'єктами. Саме ним закріплюється право власності, цільове призначення, ринкові відносини, приватизація тощо. Документ захищає права на землю та передбачає відповідальність за порушення встановлених норм.

Окремим важливим документом у сфері виконання топографічного знімання є наказ Мінагрополітики № 1675 від 17.04.2025 «Порядок топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500» [33] – нормативно-технічний документ, який регулює правила виконання геодезичних робіт, вимоги до змісту, точності та оформлення графічних та цифрових матеріалів.

Крім того, положення Закону України №3038-VI «Про регулювання містобудівної діяльності» [36], встановлюють загальні вимоги до розроблення детальних планів території та проєктів забудови.

В Україні будівництво, реконструкція та проєктування підпорядковуються низці нормативних документів, а саме Державних будівельних норм та Державних стандартів України. Спортивна інфраструктура як комплекс просторових об'єктів, не є винятком, та регламентується низкою нормативно-технічних документів, наприклад:

ДБН В.2.2-13-2003 «Спортивні та фізкультурно-оздоровчі споруди» [11] – поширюється на проєктування та реконструкцію спортивних споруд, визначає їх функціональність, протипожежні вимоги тощо.

ДБН В.2.2-3:2018 «Будинки і споруди. Заклади освіти» [12] – для спортивних майданчиків у закладах освіти виділено особливі норми, такі як відстані від вікон, шумозахист а також розташування майданчиків різних видів зайнять.

ДБН В.2.2-40:2018 «Інклюзивність будівель і споруд» [13] – норматив стосується не тільки території загального використання, а й спортивних споруд, адже вони повинні бути доступними для маломобільних груп населення.

Повертаючись до теми геодезичних вишукувань на місцевості, варто зазначити, що попри активне використання та поширення сучасних технологій в даному виді робіт, профільна нормативна база ще тільки адаптується, тому специфічних стандартів до SLAM-знімання ще не існує [15, 20]. Проте, можливість застосування даної технології, базується на загальних вимогах до точності топографо-геодезичних робіт, встановлених чинними законодавчими актами та нормами. Зокрема у вищезгаданому наказі Мінагрополітики № 1675 від 17.04.2025 «Порядок топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500» [33], описано технології та порядки проведення як лазерного сканування, так і GNSS-знімання, а ці процеси лежать в основі одночасної локалізації та картографування.

1.3 Порядок топографічного знімання. Переваги і недоліки головних методів топографічної зйомки.

Топографічне знімання – це комплекс робіт зі збору просторових даних на місцевості для подальшого створення плану. Результатом знімання вважаються геодезичні дані без обробки (файли з координатами точок, пікетами, абрисами тощо) [42].

Процес створення топографічного плану можна розділити на 3 етапи:

- 1) Попередній аналіз – аналіз документів, збір та аналіз наявних картографічних матеріалів;
- 2) Польовий етап – саме він включає процес знімання, вимагає перебування спеціаліста на місцевості. Сюди входять роботи зі збору даних, таких як: вимірювання координат, поворотних точок, висот та формування хмари точок.

3) Камеральний етап – до якого ми відносимо опрацювання отриманих результатів знімання, що виконується за використання спеціального технічного і технологічного обладнання [48].

Після успішного виконання цих неформальних етапів можна отримати топографічний план місцевості. Відсутність хоча б одного з пунктів цієї послідовності порушує технологію геодезичних робіт, що в свою чергу робить вихідну документацію некоректною (недійсною), спотворені дані тягнуть за собою відмову в погодженні документації державними органами, а в найгіршому розвитку подій призводять до критичних наслідків під час будівництва.

Сьогодні до головних методів отримання наземної геопросторової інформації варто виділити: тахеометрію, GNSS-знімання, фотограмметрію та лазерне сканування – кожен з даних видів пройшов довгий шлях модифікацій та вдосконалення, до того як ми почали широко їх використовувати в роботі. Характеристика цих методів за такими параметрами як точність, отримані результати, сфера застосування, їхні переваги та недоліки та ін. наведена у табл.1.

Таблиця 1. Характеристика основних методів топографічного знімання[14, 49]

	Тахеометричне знімання	GNSS-знімання	Фотограмметричні методи (аерознімання)	Лазерне сканування
Інструмент	Електронний тахеометр	GNSS-приймач (ровер)	Безпілотник (дрон)	Лазерний сканер
Польовий етап	Прилад вимірює верикальні та горизонтальні кути та відстані до точок, з використанням лазерного далекоміра	Метод визначення координат за допомогою глобальних супутникових систем, сутність полягає в переміщенні спеціаліста з інструментом, та точкового взяття координат	Апарат здійснює автоматизований політ, роблячи серію перекриваючих одне одного знімків з висоти.	Сканер випускає n-лазерних імпульсів у всіх напрямках, відбивших від поверхні промені повертаються

Результат роботи	Цифрова модель місцевості (набір точок з координатами x;y;z)	Координати об'єкта(ровера) у просторі (x;y;z)	Ортофотоплан, цифрова модель рельєфу	Хмара точок (детальна 3D-модель місцевості)
Точність вимірювань	1-2см	1-3см	2-5см	3-5см
Сфера застосування	Зйомки забудованих територій, будівництво	Зйомка відкритих ділянок, створення оперних геодезичних мереж	Моніторинг полів, картографування великих територій	Зйомка будівель, маркшейдерія
Переваги	Найвища точність, Незалежність від сигналу	Швидкість, Не потрібна взаємна видимість між точками	Швидкість, Наочність результату Зручно на великих територіях	Висока деталізація, Стаціонарність, Швидкість
Недоліки	Трудомісткість, Повільність, Потреба в прямій видимості	Залежність від сигналу	Залежність від погодних умов Відсутність висотних показників	Висока вартість обладнання Великий обсяг даних для опрацювання
Порівняння методів (1-10 балів)				
Точність	10	9	8	9
Час	3	6	9	9
Вартість	6	6	7	7

Аналізуючи сучасні методи знімання, можна зауважити, що вибір технології буде напряду залежати від масштабів знімання, можливостей компанії, вимог до точності та умов місцевості. Кожен з даних підходів сьогодні знаходить своїх прихильників і важко сказати що усі наявні способи отримання даних можливо замінити одним котрий буде відповідати усім критеріям. Проте поширеною є практика поєднання методик, що в свою чергу підсилює якість виконання робіт.

1.4 Застосування сучасних технологій у топографічному зніманні

Необхідність у новітніх рішеннях щодо геодезичних робіт виникла через потребу швидше обробляти великі обсяги даних, зменшити ресурсні витрати та

підвищити точність процесів. З розвитком технологій, традиційне використання паперових носіїв втратило свою актуальність. Рукописні роботи трудомісткі, повільні, складні в оцифруванні та майже неможливі в інтеграції. На заміну цьому з'являється все більше ресурсів та приладів що допомагають автоматизувати процеси – це допомагає зменшити вплив людського фактору на кінцевий результат, а також оптимізувати роботу між спеціалістами забезпечуючи легкий обмін матеріалами в межах одного цифрового середовища.

Сучасне топографічне знімання базується на використанні високоточних цифрових приладів та навігаційних системах, що забезпечує швидкі та на порядок детальніші просторові дані (рис.1).



Рис. 1. Цифрові технології збору геопросторових даних та їхні характеристики.

З настанням ери цифрових ресурсів світ став динамічнішим, та ефективнішим в багатьох сферах людського життя і геодезія тому не є виключенням. Можна багато перелічувати переваги сучасних методів над традиційними – ми змогли механізувати більшість процесів, переважна частина яких залишається за лаштунками людського ока і обробляється в межах хмарного обчислення.

Автоматизовані алгоритми систем зменшують вплив людського фактору на результат роботи, що позитивно сприяє на час та результат виробничих процесів. Традиційні паперові листи та/або дзвінки з ціллю комунікації та передання інформації, вже десятиліття як вичерпали себе, економічно вигіднішим став зв'язок за допомогою спільних інтернет платформ та програмних забезпечень що допомагають підтримувати зв'язок та дозволяють працювати над одним проєктом необмеженій кількості спеціалістів в межах нашої планети.

Новітні геодезичні технології не лише оптимізують виконання базових завдань, а й суттєво розширюють межі професійних можливостей галузі. У сфері кадастру та землекористування класичним прикладом є застосування GNSS-технологій у режимі RTK. Ця функція є базовою для сучасних приймачів і дозволяє фахівцю безпосередньо в польових умовах за лічені хвилини виконати винесення меж земельної ділянки в натуру на основі електронного файлу. Водночас перспективним вектором розвитку сучасної геодезії стає інтеграція даних мобільного лазерного сканування на основі технології SLAM у геоінформаційні системи та кадастрові бази даних. Як підкреслюють Т.О. Євсюков та О.О. Куценко, впровадження таких інструментів забезпечує оперативне оновлення геопросторової інформації та підвищує ефективність ведення Державного земельного кадастру [16]. Окрім того, технологічної модернізації зазнає сфера моніторингу та будівництва: завдяки новітнім методам спостережень стає можливим точне відстеження динаміки об'єктів — від мінімальних деформацій інженерних споруд до глобальних геодинамічних процесів.

Окремої уваги варто приділити методам створення 3D-моделей та цифрових карт. За секунди 1 прилад може збирати гігабайти геопросторових даних з місцевості оперативно формуючи хмару точок, як відкритих так і закритих об'єктів в залежності від поставленої задачі [9].

Проте, як вже було зазначено, ідеального та універсального способу збору даних не існує, хоч геодезичні новинки значно прискорили роботу спеціалістів. Щораз, ми зіштовхуємось, не тільки з технічними недоліками, але й з концептуальними, а це ставить нас в становище, де варто враховувати більше ніж параметри приладів для зйомки.

Ефективність геодезичного обладнання, можна спостерігати за якісного аналізу місцевості проведення робіт, погодних умов, наявності перешкод (споруди, зелені насадження) та іншої інфраструктури. Кожен із запропонованих, навіть в узагальненому форматі, приладів потребує коректних налаштувань, розуміння алгоритмів і координатних систем, а вміння та досвід спеціаліста, в даному питанні, відіграють ключову роль. При всіх зазначених нюансах варто виділити один з найбільш поширених, що головним чином впливає на вибір обладнання – це спеціалізація та фінансові можливості геодезичних компаній.

1.5 Сутність технології SLAM і сфери застосування

Технологія SLAM розшифровується як Simultaneous Localization and Mapping, що означає «одночасна локалізація та картографування».

SLAM – це процес, за допомогою якого мобільний робот може побудувати карту середовища та одночасно використовувати її для визначення свого місцезнаходження [29]. Концепція полягає в тому, щоб створити для пристрою просторове усвідомлення, так само як це відбувається в людини, тим самим розриваючи замкнене коло навігації: щоб орієнтуватись, потрібна готова локація, але саму локацію неможливо нанести без орієнтування.

Найбільш складним є випадок, коли апріорна інформація про простір повністю відсутня, тому система змушена розв'язувати цю двоєдину задачу в режимі реального часу, паралельно адаптуючись до невідомого оточення [28].

Математично задача SLAM описується як оцінка апостеріорного розподілу ймовірностей стану сенсора та карти середовища на основі отриманих вимірювань і керуючих впливів:

$$p(x_k, m \mid z_{1:k}, u_{1:k})$$

де x_k – стан (позиція) сенсора; m – карта середовища; z – вимірювання; u – керуючі впливи (рух) [6, 28].

Ефективність SLAM досягається завдяки синергії декількох типів сенсорів, кожен з яких забезпечує отримання різних характеристик навколишнього середовища. Система об'єднує дані з лідарів, камер, радарів та інерціальних датчиків (рис.2). Завдяки такій комбінації способів збору даних, пристрій регулярно корегує помилки в реальному часі, а алгоритми зшивають ці дані в єдину просторову модель [45].

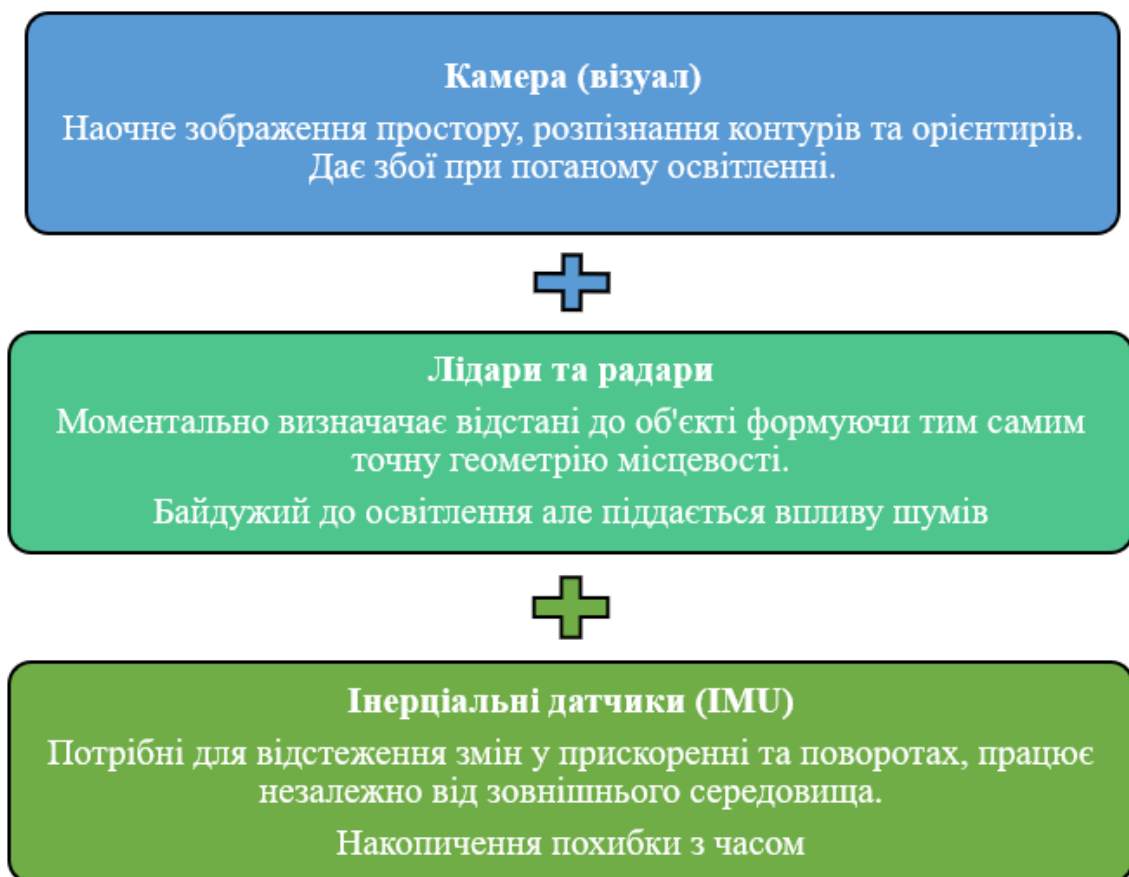


Рис. 2. Інтеграція різних сенсорів у сучасних SLAM-системах

На відміну від інших геодезичних приладів, система SLAM створює власну картину простору, враховуючи усі основні елементи фізичних об'єктів, та відображаючи власне положення в ній.

Визначення просторового положення системи в режимі реального часу здійснюється шляхом комплексного аналізу даних, отриманих із декількох джерел [28]. Насамперед використовується інерціальна навігаційна система (IMU), яка за допомогою гіроскопів та акселерометрів реєструє прискорення, переміщення і зміни орієнтації пристрою в просторі. Додатково застосовується метод зіставлення даних сканування, що полягає у порівнянні нових вимірювань із раніше отриманими даними для визначення величини та напрямку зміщення системи. Для зменшення накопичення похибок використовується механізм замикання петель, який дозволяє розпізнавати раніше відскановані ділянки та коригувати траєкторію руху шляхом уточнення координат і взаємного положення об'єктів на створюваній карті [41].

Побудова хмари точок здійснюється шляхом реєстрації відбитих лазерних імпульсів від об'єктів навколишнього середовища. На основі виміряної відстані до поверхні та просторового положення сканера кожній точці присвоюються координати X , Y та Z . У результаті безперервного збору великої кількості таких вимірювань формується хмара точок, яка відображає геометрію об'єктів і є основою для створення тривимірної моделі місцевості [20].

Популярності даний метод здобув завдяки можливості виконувати локалізацію та картографування одночасно в режимі реального часу без потреби у попередньо створених картах або розвиненій опорній мережі. Це суттєво скорочує час виконання робіт і підвищує ефективність збору просторових даних у складних або малодосліджених середовищах.

Переваги SLAM полягають в оперативному зборі просторових даних, автоматичному узгодженні результатів вимірювань і побудові цілісної тривимірної моделі об'єктів. На противагу традиційним методам знімання, технологія може ефективно працювати в умовах неповної або відсутньої

інформації про місцевість, зберігаючи високу деталізацію та повноту отриманих даних.

До основних обмежень SLAM відносять залежність точності результатів від якості сенсорних даних, складність роботи в динамічному середовищі та накопичення похибок під час тривалого переміщення. Додатковими факторами є високі вимоги до обчислювальних ресурсів і зниження ефективності в середовищах із недостатньою кількістю характерних орієнтирів для надійної локалізації [47].

Точність цієї технології визначається сукупністю технічних та алгоритмічних факторів. Ключовий вплив визначають якість і тип сенсорів, що використовуються для збору даних, характеристики навколишнього середовища, наявність характерних орієнтирів для локалізації, а також ефективність алгоритмів обробки та оптимізації даних. Важлива роль припадає на можливість виконати замикання петель, що зменшує накопичення похибок під час руху. У задачах, де потрібна підвищена точність позиціонування, додатково застосовуються зовнішні просторові прив'язки, зокрема опорні точки або GNSS-вимірювання, які забезпечують коригування координат і зменшення дрейфу системи.

Технологія SLAM є базовим компонентом систем навігації в автономній робототехніці, безпілотному транспорті (зокрема БПЛА), системах віртуальної та доповненої реальності, а також у медицині й промисловості. У геодезичній практиці, будівництві та архітектурі її алгоритми складають основу мобільного лазерного сканування. Сучасний досвід використання SLAM виходить за межі суто інженерних задач: технологію все частіше застосовують для інвентаризації природоохоронних зон і формування цифрових реєстрів об'єктів природно-заповідного фонду. Така багатовекторність підтверджує універсальність методу при вирішенні різнопланових просторових завдань [4, 27].

Найвища ефективність технології спостерігається під час роботи зі статичними об'єктами та середовищами, що містять достатню кількість геометричних елементів для надійної локалізації. Особливо доцільним є її

використання в місцях з обмеженим або відсутнім супутниковим позиціонуванням, зокрема в приміщеннях, тунелях, шахтах, підземних спорудах та інших закритих просторах, де традиційні методи навігації мають суттєві обмеження [38].

Технологія SLAM є оптимальним інструментом для зйомки спортивних комплексів і стадіонів, що характеризуються масштабністю, складною архітектурою та поєднанням відкритих і закритих зон. Застосування мобільних лазерних сканерів дозволяє оперативно збирати просторові дані для побудови деталізованих 3D-моделей трибун, підтрибунних приміщень та інженерних комунікацій. Подібна методика релевантна й для цифровізації об'єктів культурної спадщини. У цій сфері лазерне сканування забезпечує високоточне документування складних геометричних форм, підтверджуючи універсальність технології в задачах просторового аналізу різнотипних споруд [5].

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИХІДНІ ДАНІ

2.1. Загальна характеристика території стадіону НУБіП України

В даній кваліфікаційній роботі об'єктом дослідження виступала територія стадіону Національного університету біоресурсів і природокористування України (рис.3), яка використовується для проведення навчально-тренувальних занять, спортивних заходів та інших видів фізкультурно-оздоровчої діяльності. Спортивна зона є складовою частиною інфраструктури університетського кампусу та характеризується значною площею, наявністю спортивних споруд і прилеглих елементів благоустрою [40].



Рис. 3. Зображення території стадіону НУБіП України на супутниковому знімку Google Earth [3]

Досліджуваний об'єкт розташований в місті Києві, у Голосіївському районі, в серці території Національного університету біоресурсів і природокористування України, за адресою: вул. Героїв Оборони, 18, м. Київ.

Відповідно до відомостей Державного земельного кадастру, стадіон розташований у межах земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:306:0003, загальна площа якої становить 13,1045 га [19]. Водночас безпосереднім об'єктом топографо-геодезичних досліджень є територія спортивного комплексу площею близько 3,5 га, що включає футбольне поле з трибунами, спортивні майданчики, навчальний корпус №9, проїзди, пішохідні доріжки, елементи благоустрою та зелені насадження. Територія має складну конфігурацію та сформована як єдине спортивне ядро в структурі академмістечка.

Межі досліджуваної території визначаються існуючими огорожами, проїздами та природними елементами місцевості. З півночі – стадіон межує з вулицею Героїв Оборони, яка забезпечує основний транспортний доступ до об'єкта; із заходу розташовані спортивні споруди, студентський сквер та навчальні корпуси НУБіП України; з півдня – території університетського містечка, а саме кафедра військової підготовки, також межує з ділянкою що належить Еколого-природничому ліцею №116; зі сходу – Сільськогосподарський провулок та територія Ботанічного саду НУБіП України. Значну частину території займають відкриті спортивні майданчики та «зелені» островки, що формують сприятливе середовище для проведення спортивних заходів.

Функціональне призначення досліджуваної ділянки визначається її належністю до спортивної інфраструктури Національного університету біоресурсів і природокористування України (рис.4). Стадіон використовується для забезпечення освітнього процесу здобувачів, проведення занять з фізичного виховання, спортивних тренувань і підготовки збірних команд університету.

Крім того, на території комплексу проводяться спортивні змагання різного рівня, фізкультурно-оздоровчі заходи, університетські свята та інші масові події [40].

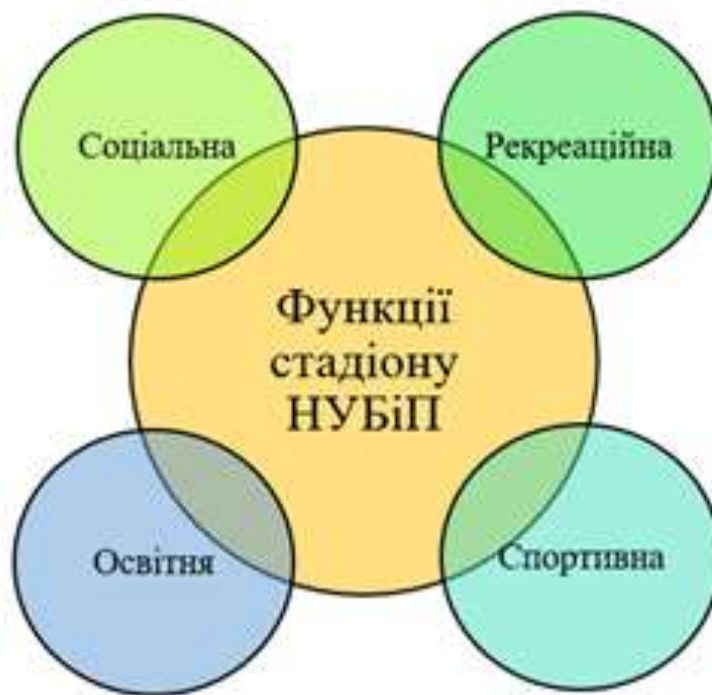


Рис. 4. Головні функції, які виконує території стадіону НУБіП України

Досліджувана територія включає спортивні споруди (футбольне поле з біговими доріжками, трибуни, спортивні майданчики та корпус фізичного виховання), елементи інженерної інфраструктури (проїзди, пішохідні доріжки, огорожі, опори освітлення) та об'єкти благоустрою й озеленення (дерева, кущі, газони, квітники). З точки зору топографічного знімання ділянку можна характеризувати, як насичену різномірними елементами ситуації.

Територія стадіону є взірцевим об'єктом для дослідження можливостей технології SLAM, завдяки поєднанню відкритих просторів і ділянок зі складною конфігурацією забудови. Наявність спортивних споруд, зелених насаджень та інших характерних елементів забезпечує достатню кількість орієнтирів для стабільної роботи алгоритмів локалізації. Водночас масштаб об'єкта дозволяє оцінити ефективність мобільного лазерного сканування в реальних умовах та перевірити можливість оперативного отримання детальних просторових даних для подальшого створення топографічних матеріалів.

2.2. Природно-кліматичні та інженерно-геодезичні умови

Досліджувана територія розташована в межах лісостепової природної зони України. Клімат району є помірно-континентальним і характеризується теплим літом, м'якою зимою та достатнім рівнем зволоження. Середньорічна температура повітря становить близько $+9...+11\text{ }^{\circ}\text{C}$, а середньорічна кількість атмосферних опадів коливається в межах 550–650 мм [21].

Найважливішим фактором, що визначає ефективність топографо-геодезичних вишукувань, є сезонні метеоумови (наявність опадів, снігу, рослинності та рівень освітлення). Найдоцільніше виконувати польові вимірювання у весняно-осінній період, за сприятливих погодних умов та відсутності рясних опадів.

Рельєф досліджуваної території загалом є рівнинним із незначними локальними перепадами висот. Відповідно до аналізу висотного положення місцевості абсолютні відмітки в межах об'єкта змінюються приблизно від 174 до 187 м (рис.5), при цьому найбільші перепади спостерігаються на прилеглих озеленених ділянках.

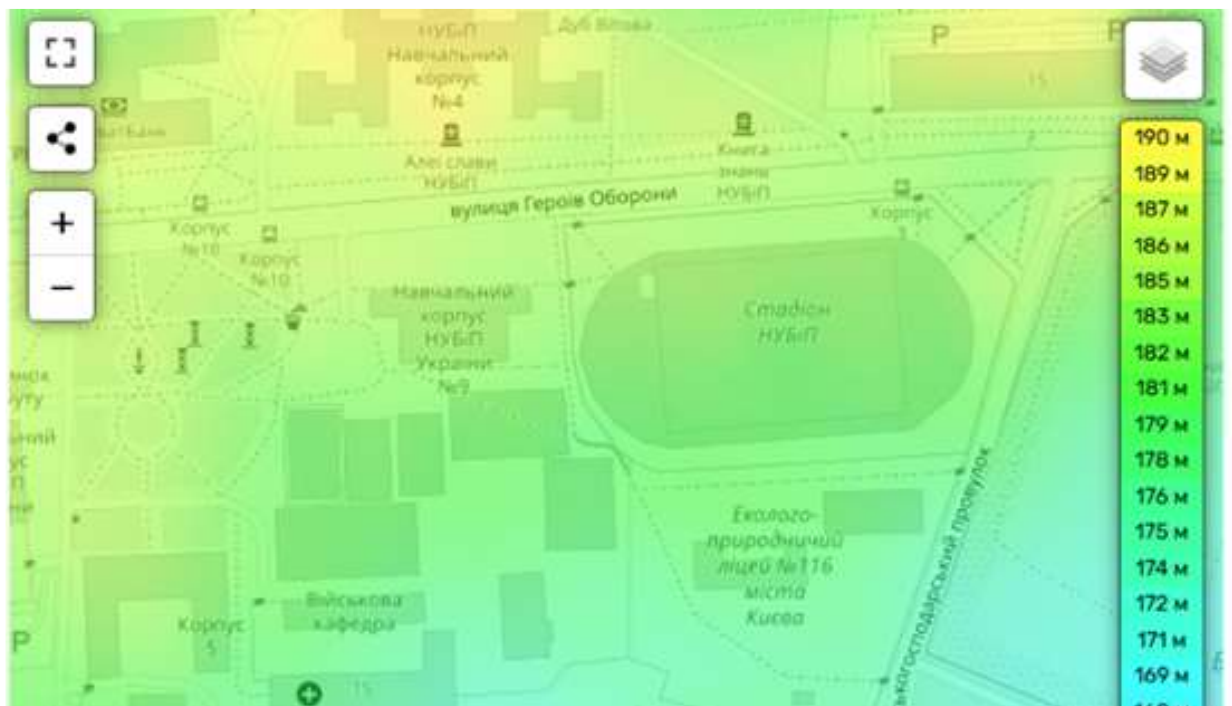


Рис. 5. Аналіз рельєфу території стадіону НУБіП України за даними цифрової моделі місцевості [43]

Поверхня спортивного ядра має вирівняний характер, що обумовлено вимогами до експлуатації спортивних споруд та проведення масових заходів.

Територія характеризується гармонійним поєднанням спортивних споруд із природним ландшафтом Голосіївського лісопарку. Основна ділянка стадіону має переважно рівнинний рельєф, що значно спрощує виконання топографо-геодезичних вишукувань. Проте на периферійних ділянках простежуються незначні перепади висот, які обов'язково враховуються під час знімання для точного відображення на топографічному плані.

На території стадіону та на його околицях поширені різні елементи озеленення: дерева, кущі, газони й захисні смуги. Найбільше їх зосереджено вздовж меж спортивного комплексу та на прилеглих ділянках біля дороги навпроти Ботанічного саду НУБіП України і Голосіївського лісопаркового масиву.

Зелені насадження впливають на виконання топографічного знімання та мобільного лазерного сканування, оскільки можуть частково закривати окремі об'єкти й ускладнювати збір просторової інформації. Водночас дерева та інші характерні природні елементи слугують додатковими орієнтирами для алгоритмів SLAM під час локалізації та побудови просторової моделі місцевості.

Щільна міська забудова та наявність лінійних чи вертикальних споруд дещо ускладнюють геодезичні вимірювання. Водночас саме ці об'єкти слугують чудовими просторовими орієнтирами. Разом із транспортною мережею та локальними інфраструктурними об'єктами вони забезпечують достатню інформативність території, що дозволяє створювати точні топографічні плани й детальні тривимірні моделі [22].

Аналіз природних та інженерно-геодезичних умов підтверджує, що ділянка цілком придатна для мобільного лазерного сканування. Тут багато орієнтирів, від будівель і доріг до елементів благоустрою та зелених насаджень, що значно полегшує прив'язку системи. Незначні перепади висот також спрощують як польові вимірювання, так і подальшу обробку даних. Завдяки поєднанню забудованих ділянок, спортивних майданчиків та природних зон, ми

зможемо побудувати повноцінну тривимірну модель місцевості та на практиці оцінити ефективність SLAM-технології для створення топографічних планів.

2.3. Аналіз наявних картографічних матеріалів

Успішне виконання топографо-геодезичних досліджень базується на якості та повноті вихідних даних. З метою вивчення особливостей розвитку території стадіону НУБіП України, аналізу її сучасного стану та підготовки інформаційної основи для мобільного лазерного сканування було зібрано комплекс картографічних і геопросторових матеріалів різних періодів створення. Опрацьовані джерела охоплюють тривалий проміжок часу, від архівних матеріалів минулого сторіччя до актуальних даних дистанційного зондування Землі, у складі вихідних даних: історичні карти, топографічні плани, аерофотознімки, сучасні супутникові зображення високої роздільної здатності, матеріали попередніх геодезичних вишукувань, TIFF-файли інженерних мереж, а також відомості з цифрових картографічних сервісів.

Зібрані картографічні матеріали детально відображають природні та антропогенні особливості ділянки. Це дозволило проаналізувати рельєф, забудову, логістику, зелені насадження та функціональні зони. Крім того, ми точно визначили, як розташовані спортивні арени та інші об'єкти інфраструктури стадіону.

Аналіз картографічних матеріалів різних історичних періодів дозволив простежити етапи формування досліджуваної території та встановити особливості її просторового розвитку. Найдавніші доступні картографічні джерела другої половини XIX століття (рис. 6) свідчать, що територія сучасного стадіону та прилеглих земель перебувала в межах природного ландшафту Голосіївської місцевості, де переважали лісові масиви, відкриті галявини та окремі господарські об'єкти. На картах початку XX століття (рис. 7) спостерігається поступове освоєння території, розвиток дорожньої мережі та поява нових елементів забудови.



Рис. 6. Фрагмент історичної карти місцевості Голосієво 1865 р. [25]



Рисунок 7. Історична карта території Голосієва 1918 р. [25].

Особливо інформативними є аерофотознімки та топографічні карти 1930-1940-х років, що відображають початок формування навчально-дослідної інфраструктури на території Голосіїво. На аерофотознімках 1941-1946 років (рис. 8) простежуються перші значні розчищені ділянки, транспортні зв'язки та окремі споруди, що стали основою подальшого розвитку кампусу.



Рис. 8. Аерофотознімок на територію об'єкта дослідження 1944 р. [25]

У післявоєнний період забудова поступово ущільнюється, збільшується кількість будівель, формується система проїздів і функціональних зон. Найактивніший розвиток території припадає на другу половину XX ст., коли відбувається розширення теперішнього НУБіП України та створення сучасної структури університетського містечка. Порівняння історичних карт із сучасними супутниковими знімками (рис. 9) свідчить про суттєве скорочення відкритих територій за рахунок забудови, водночас значна частина зелених насаджень Голосіївського лісопаркового масиву була збережена. Саме в цей період

формується спортивне ядро університету, до складу якого входить сучасний стадіон НУБіП України.



Рис. 9. Зображення території стадіону НУБіП України на супутниковому знімку [25].

Для аналізу сучасного стану території та підготовки вихідної основи для виконання топографічного знімання було також використано результати попередніх геодезичних робіт на дану територію. Особливу цінність становлять матеріали геодезичних вишукувань, виконаних у 2016 році магістрами факультету землепорядкування під керівництвом доцента кафедри геодезії та картографії Т. О. Євсюкова та асистента І. А. Опенька (рис.10, рис. 11). У межах цих робіт було проведено топографічне знімання футбольного поля та нівелювання його поверхні з метою оцінки технічного стану спортивної споруди та визначення відповідності ухилів вимогам водовідведення. За результатами дослідження встановлено наявність локальних ділянок із порушенням проєктних ухилів, що могло спричиняти накопичення поверхневих вод і негативно впливати на стан газонного покриття. Отримані матеріали стали підставою для обґрунтування необхідності реконструкції футбольного поля.



Рис. 10. Проведення топографо-геодезичних робіт магістрами факультету землевпорядкування на стадіоні НУБіП України 2016 р. [24]



Рис. 11. Результат виконання магістрами кафедри геодезії та картографії тахеометричного знімання футбольного стадіону НУБіП України 2016р. [24]

Крім того, під час виконання роботи було використано архівний топографічний план території стадіону (рис. 12), схеми інженерних мереж водопостачання, каналізації (рис. 13), а також план тахеометричного знімання футбольного поля, створений у межах дослідження 2016 року (рис. 10).

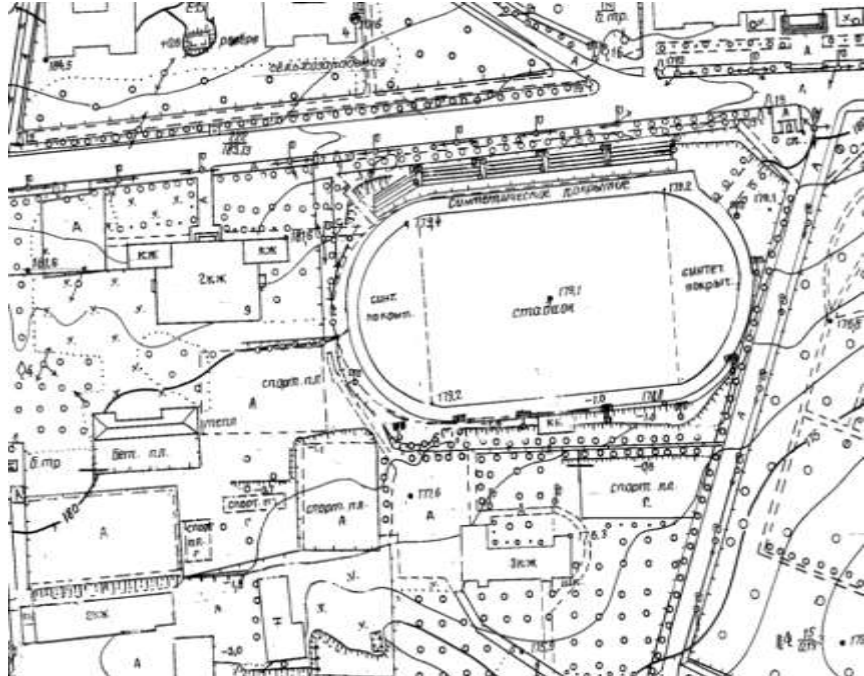


Рис. 12. Викопіювання з топографічного плану на досліджувану територію масштабу 1:2000 (1985 р.)

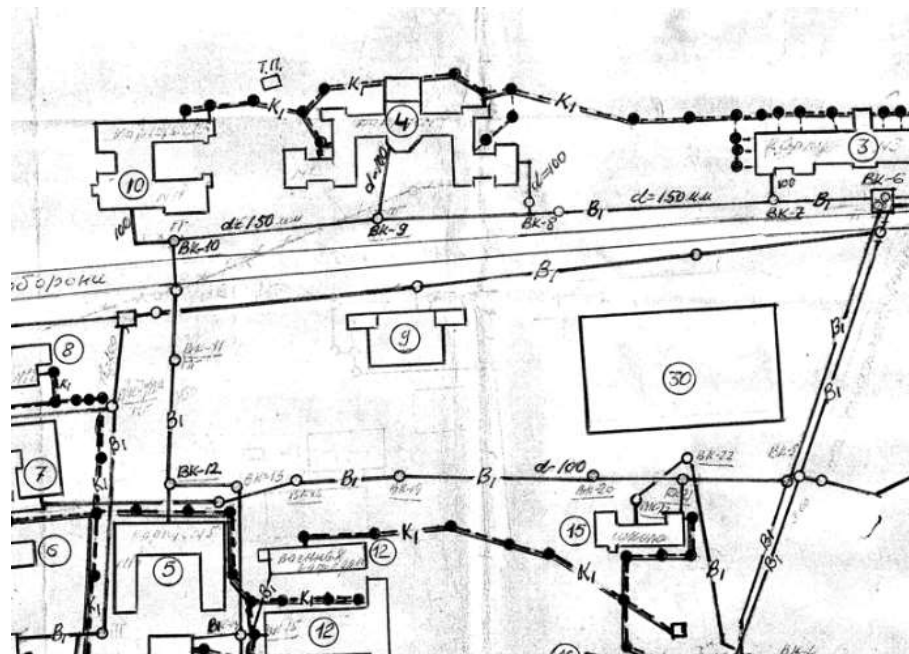


Рис. 13. Викопіювання зі схеми водовідведення та каналізації на досліджуваній території (2012 р.)

Зазначені матеріали дозволили уточнити розташування інженерної інфраструктури, перевірити повноту отриманих просторових даних та виконати порівняльний аналіз результатів традиційних геодезичних методів та нових технологій.

Зібрані матеріали (карти, плани, аерофотознімки) є цілком достатніми для глибокого дослідження території стадіону НУБіП України і створення топографічного плану масштабу 1:2000. Їхня головна перевага – можливість простежити еволюцію ділянки з другої половини XIX століття до наших днів. Завдяки такому часовому охопленню ми можемо чітко побачити трансформацію забудови, дорожньої мережі та ландшафту. Загалом, комплексний аналіз на основі як архівних, так і сучасних супутникових даних повністю розкриває історію функціонування цієї території.

Порівнювати наявні матеріали важко через їхній різний масштаб і різний рівень деталізації. Крім того, архівні відомості втратили актуальність і непридатні для складання сучасного топоплану. Проте вони надзвичайно важливі для історичного аналізу території, зіставлення з поточними геодезичними даними та формування основи для майбутніх картографічних розробок.

2.4. Обґрунтування вибору масштабу 1:2000

Вибір масштабу топографічних планів в Україні регламентується нормативно-правовими документами у сфері геодезії, картографії та містобудування. Основним документом є Порядок топографічного знімання, затверджений наказом Міністерства аграрної політики та продовольства України № 1675[33], який визначає вимоги до створення топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. Загальні правила щодо змісту, розграфки та геодезичної основи топографічних планів встановлюються положеннями з їх створення та оновлення [30]. Крім того, вимоги до застосування окремих масштабів під час розроблення містобудівної документації визначаються ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій» [10]. Відповідно до зазначених

нормативів масштаб плану обирається залежно від площі об'єкта, рівня деталізації місцевості та цілей подальшого використання матеріалів (табл. 2).

Таблиця 2. Порівняльна характеристика можливостей топографічних планів різних масштабів

Характеристика	1:500	1:1000	1:2000	1:5000
Основне призначення	Проектування будівель, інженерних мереж, благоустрою, виконавчі знімання	Детальне планування територій, проекти забудови окремих кварталів	Генеральні плани населених пунктів, детальні плани територій, земельно-кадастрові роботи	Планування великих територій, оглядові та аналітичні роботи
Рівень деталізації	Дуже високий	Високий	Достатній для більшості проєктних рішень	Середній
Відображення дрібних об'єктів	Повне відображення всіх елементів ситуації	Відображення більшості елементів	Відображення основних об'єктів та контурів	Відображення лише найбільш значущих елементів
Точність просторових даних	Максимальна	Висока	Достатня для містобудівних потреб	Орієнтовна
Орієнтовна площа охоплення	Окремі земельні ділянки, невеликі об'єкти	Невеликі та середні території	Мікрорайони, квартали, великі громадські об'єкти	Населені пункти та значні території
Обсяг польових робіт	Дуже великий	Великий	Помірний	Відносно невеликий
Обсяг графічної інформації	Максимальний	Значний	Оптимальний	Обмежений
Використання у містобудуванні	Для окремих об'єктів та вузлів забудови	Для локальних проєктних рішень	Основний масштаб містобудівної документації	Для загального планувального аналізу
Використання для топографічного знімання стадіону НУБіП	Найбільш доцільний	Можливий	Недостатня деталізація окремих елементів	Не придатний для детального відображення об'єкта

Огляд характеристик прийнятих рядів масштабів топографічного знімання показує, що для створення топографічного плану території стадіону НУБіП України найбільш доцільним є масштаб 1:500. Він забезпечує необхідну точність

і повноту відображення спортивних споруд, елементів благоустрою, дорожньої мережі, зелених насаджень та інженерної інфраструктури. Масштаби 1:1000 і 1:2000 можуть використовуватися для загального аналізу території, проте не містять достатньої деталізації для виконання проєктних і топографо-геодезичних робіт на рівні окремого спортивного комплексу.

Водночас, масштаб 1:2000 забезпечує необхідний рівень деталізації спортивних споруд, бігових доріжок, трибун, елементів благоустрою та озеленення, водночас даючи змогу відобразити всю досліджувану територію в межах одного картографічного документа. Використання масштабів 1:500 або 1:1000 в межах завдання для даного об'єкта є недоцільним, оскільки призводить до збільшення обсягів польових і камеральних робіт, без суттєвого підвищення інформативності кінцевих матеріалів.

Для знімання обрано технологію SLAM, точність якої повністю відповідає вимогам до топографічних планів масштабу 1:2000. Зібрані просторові дані дозволяють точно відтворити рельєф і ситуацію на місцевості, створюючи надійну геопросторову основу для містобудування, землеустрою та інженерного проєктування.

Мобільне лазерне сканування має певні обмеження під час виконання високоточних топографо-геодезичних робіт. Згідно з чинними нормативними вимогами для топографічних планів масштабу 1:2000, гранична похибка визначення положення контурів не повинна перевищувати 0,4 мм на плані, що відповідає 0,8 м на місцевості [8]. Сучасні SLAM-сканери формують надзвичайно щільні хмари точок – від сотень до кількох тисяч точок на квадратний метр, забезпечуючи необхідний рівень деталізації для створення топографічних матеріалів масштабу 1:2000. Таким чином, з точки зору повноти відображення ситуації та рельєфу можливості технології SLAM є достатніми для виконання поставлених завдань.

Разом із тим основною проблемою залишається забезпечення геодезичної точності отриманих даних. Середня похибка визначення координат у SLAM-системах зазвичай становить від 1 до 5 см, а в найбільш сприятливих умовах

може досягати 1-2 см [26]. На локальних ділянках такі показники є достатньо високими, однак під час збільшення протяжності маршруту виникає накопичення похибок позиціонування, відоме як дрейф. У результаті можуть виникати деформації окремих фрагментів хмари точок та відхилення їх абсолютного положення від реальних координат місцевості.

Саме тому під час використання мобільного лазерного сканування на основі технології SLAM особливу увагу необхідно приділяти контролю точності та якості побудови траєкторії сканування. Для мінімізації впливу дрейфу доцільно передбачати замикання маршрутів сканування, а також використовувати контрольні точки, координати яких визначені незалежними геодезичними методами. Такий підхід дає змогу виявляти та коригувати можливі відхилення, забезпечуючи узгодженість і коректне просторове положення хмари точок. Використання традиційних геодезичних вимірювань підвищує надійність і точність результатів, однак ключове значення має правильна організація процесу знімання та контроль якості отриманих даних. За умови дотримання цих вимог технологія SLAM може ефективно застосовуватися для створення топографічних матеріалів масштабу 1:2000 і менше, забезпечуючи високу швидкість збору даних і детальне відображення об'єктів місцевості [20].

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ТОПОГРАФІЧНОГО ЗНІМАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ SLAM

3.1. Вибір обладнання для SLAM-зйомки

При виборі геодезичного обладнання ключовим завданням було повністю охопити 3,5 гектара території стадіону НУБіП України. Комплект приладів мав забезпечити збір точних просторових даних про всі наявні об'єкти: від спортивних споруд та елементів благоустрою до зелених насаджень і мереж інженерної інфраструктури, а також формування хмари точок, придатної для подальшої обробки та створення топографічного плану масштабу 1:2000 відповідно до встановлених вимог щодо точності планового і висотного положення об'єктів [46]. Крім того, обладнання мало забезпечувати оперативний збір геопросторової інформації та формування хмари точок, придатної для подальшої обробки, побудови цифрової моделі місцевості та створення топографічних матеріалів. Польові вимірювання виконувалися із застосуванням обладнання, наданого компанією «GeoFIX». Фахівці підприємства Георгій Юрченко та Дмитро Матвійчук супроводжували процес знімання, надаючи необхідну технічну та консультаційну підтримку.

Для виконання польових робіт було використано комплекс обладнання, що складався з мобільної системи лазерного сканування SLAM R100 та GNSS-приймача AlphaGeo GeoPuls RTK. Основним вимірювальним приладом виступив сканер SLAM R100, який забезпечує збір просторових даних, побудову траєкторії руху та формування хмари точок у режимі реального часу [20]. Для створення геодезичної основи, визначення координат контрольних точок і забезпечення просторової прив'язки результатів сканування використовувався GNSS-приймач AlphaGeo GeoPuls RTK. Даний приймач підтримує RTK-позиціонування, багаточастотне відстеження супутникових систем, а також забезпечує сантиметрову точність визначення координат у режимі реального часу [1, 39]. Поєднання мобільного лазерного сканування та супутникових

геодезичних вимірювань дозволило отримати детальні просторові дані та забезпечити контроль точності результатів знімання.

GNSS-приймач AlphaGeo GeoPuls RTK є сучасним багатосистемним геодезичним приймачем, призначеним для високоточного визначення координат у режимах RTK та статичних спостережень. Пристрій підтримує прийом сигналів основних глобальних навігаційних супутникових систем (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), що забезпечує стабільність роботи та точність позиціонування до $\pm 8 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$ у плані та $\pm 15 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$ по висоті в режимі RTK навіть у складних умовах спостережень. Приймач оснащений вбудованим модемом для отримання RTK-поправок, бездротовими інтерфейсами зв'язку та акумулятором, що забезпечує тривалу автономну роботу в польових умовах. Заявлена точність визначення координат у режимі RTK становить кілька сантиметрів у плані та по висоті, що відповідає вимогам більшості інженерно-геодезичних робіт [39]. У межах даного дослідження GNSS-приймач використовувався для визначення координат контрольних точок, які надалі застосовувалися під час створення геодезичної основи та оцінювання точності результатів мобільного лазерного сканування.

Основним вимірювальним засобом під час виконання робіт був мобільний лазерний 3D-сканер SLAM R100, призначений для оперативного збору просторових даних та побудови тривимірних моделей місцевості. Принцип роботи приладу базується на технології одночасної локалізації та картографування SLAM, яка забезпечує визначення положення сканера в просторі та одночасне формування цифрової моделі навколишнього середовища. Під час руху оператора система безперервно виконує лазерне сканування території, визначає власну траєкторію та об'єднує отримані дані в єдину хмару точок [15, 220].

До складу сканувального комплексу входять лазерний сканер та інерціальний вимірювальний модуль (IMU). Лазерний далекомір використовує безпечне для зору випромінювання класу 1 з довжиною хвилі 903–905 нм та забезпечує кругове сканування з полем огляду $360^\circ \times 270^\circ$ [41, 47]. Інерціальний

модуль, що включає гіроскопи та акселерометри, фіксує зміни положення, швидкості та орієнтації пристрою в просторі, забезпечуючи стабільність роботи алгоритмів SLAM під час переміщення оператора [28]. Опрацювання даних виконується за допомогою спеціалізованих алгоритмів, які аналізують геометрію навколишнього середовища, визначають траєкторію руху та здійснюють побудову просторової моделі навіть за відсутності супутникового сигналу [38, 45].

Технічні можливості SLAM R100 дозволяють виконувати вимірювання на відстані до 100–120 м та реєструвати від 300 000 до 320 000 точок за секунду. Заявлена відносна точність побудови просторової моделі становить близько 6 мм, а точність позиціонування за результатами обробки зазвичай перебуває в межах 1,5–3 см залежно від умов знімання та особливостей об'єкта [22, 41]. Результатом роботи приладу є високощільна тривимірна хмара точок, яка може експортуватися у стандартні формати для подальшої обробки в CAD-, BIM- та геоінформаційних системах. Отримані дані використовуються для створення цифрових моделей місцевості, топографічних планів та виконання інженерно-геодезичного аналізу [20, 26].

Використання мобільного лазерного сканера SLAM R100 є доцільним для знімання території стадіону НУБіП України завдяки поєднанню значної площі об'єкта, різноманітності елементів ситуації та необхідності оперативного збору просторових даних. Територія дослідження включає відкриті спортивні майданчики, трибуни, дорожньо-стежкову мережу, зелені насадження та об'єкти інженерної інфраструктури, що потребує швидкого та комплексного охоплення під час польових робіт [20].

Технологія SLAM суттєво прискорює польові роботи порівняно з традиційним топографічним зніманням. Мобільність сканера дозволяє збирати дані в русі без постійного перевстановлення приладу. На виході ми отримуємо щільну тривимірну хмару точок із детальною інформацією про рельєф. Для території стадіону це головна перевага, адже знімання дозволяє швидко та

детально зафіксувати трибуни, спортивні споруди, бігові доріжки й зелені насадження [6, 26].

Мобільне лазерне сканування та GNSS-вимірювання взаємно компенсують недоліки одне одного. Технологія SLAM оперативно формує щільну й детальну хмару точок, але накопичує похибки позиціонування у просторі. Приймач з RTK-поправкою, навпаки, не створює тривимірну модель, проте забезпечує точну прив'язку до державної геодезичної мережі. Дует цих методів гарантує як високу деталізацію об'єктів, так і координатний контроль результатів.

Комплекс із лазерного сканера SLAM R100 та GNSS-приймача AlphaGeo GeoPuls RTK повністю вирішує завдання дослідження. Ця комбінація дозволяє швидко зібрати просторові дані, отримати детальну хмару точок та проконтролювати точність вимірювань. Спільне застосування мобільного сканування та супутникових технологій стало надійною основою для створення топографічного плану стадіону НУБіП України у масштабі 1:2000.

3.2. Створення геодезичної основи

Геодезична основа – це сукупність опорних точок із відомими координатами, які використовуються для просторової прив'язки результатів вимірювань до прийнятої системи координат. Її створення є обов'язковим етапом виконання топографо-геодезичних робіт, оскільки забезпечує єдність усіх отриманих даних та можливість їх подальшого використання під час створення картографічних матеріалів [23, 46].

Для якісного мобільного сканування замало просто пройти територією з приладом. Оскільки «сира» хмара точок будується в умовній системі відносно траєкторії руху сканера, вона неминуче накопичує похибки. Щоб виправити це, потрібна жорстка геодезична основа. Вона фіксує результати знімання в єдиній державній системі координат, контролює точність і коригує просторове положення об'єктів. Тільки після такої координатної прив'язки лазерні дані можна безперешкодно поєднувати з кадастровими картами, аерофотознімками чи старими планшетами. Без цього етапу неможливо створити точний

топографічний план або коректно інтегрувати результати у геоінформаційні системи [22].

Топографо-геодезичні роботи на стадіоні НУБіП України виконувалися у державній системі координат УСК-2000. Вона є обов'язковою для ведення Державного земельного кадастру та створення планово-картографічних матеріалів в Україні. Робота в цій єдиній геодезичній основі гарантує правильне просторове положення об'єктів. Це дозволяє безперешкодно інтегрувати результати сканування у наявні геоінформаційні системи та зіставляти їх із архівними картами [30].

Координати опорних точок визначали в режимі RTK за допомогою GNSS-приймача AlphaGeo GeoPuls (рис. 14-15). Висоти обчислювали в Балтійській системі 1977 року. Орієнтування в єдиному державному координатно-висотному просторі забезпечує точну прив'язку хмари точок і створило жорстку геодезичну основу для подальшого моделювання території та складання топографічного плану масштабу 1:2000 [1].



Рисунок 14. Визначення координат опорної точки за допомогою GNSS-приймача AlphaGeo GeoPuls



Рисунок 15. Закріплення та визначення положення опорної точки на території стадіону НУБіП України.

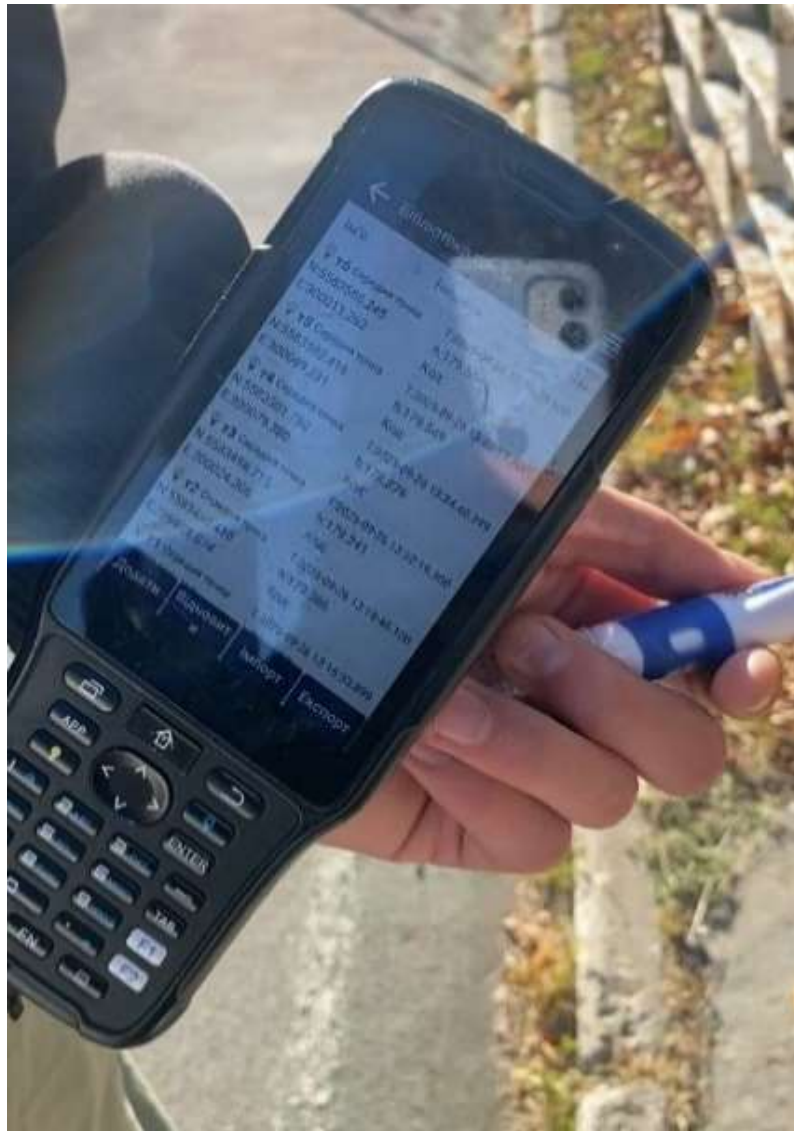


Рисунок 16. Результати RTK-вимірювань та контроль координат опорних точок.

Визначення координат опорних точок здійснювалося відносно мережі постійно діючих референтних GNSS-станцій, що забезпечують передачу поправок та дозволяють отримувати координати з сантиметровою точністю без необхідності встановлення власної базової станції [39]. Отримані координати використовувалися для формування геодезичної основи, необхідної для подальшої просторової прив'язки результатів мобільного лазерного сканування та контролю точності отриманих даних (рис. 16).

Для забезпечення рівномірного охоплення території стадіону було закладено шість опорних точок, розташованих по його периметру (рис. 17). Місця для пунктів обирали з урахуванням їхньої стабільності, доступності для

вимірювань і придатності для подальшого контролю сканування. Рівномірне розміщення точок навколо спортивного ядра забезпечило надійну геометрію геодезичної основи. Це створило необхідні умови для жорсткої перевірки точності отриманої хмари точок.

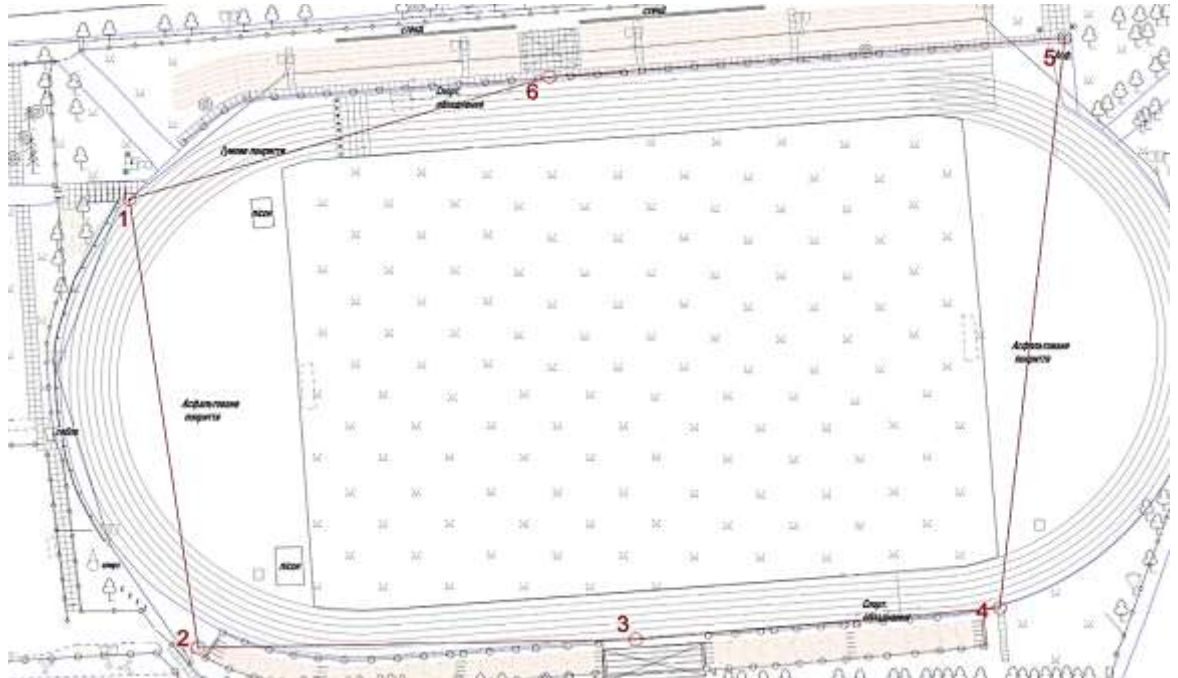


Рис. 17. Схема розташування опорних точок геодезичної основи на території стадіону НУБіП України

Для кожної з 6-ти точок отримано планові координати в державній системі координат УСК-2000, які стали вихідною основою для просторової прив'язки результатів мобільного лазерного сканування. Отримані дані оформлено у вигляді каталогу координат, що містить номер точки та її координати по осях X, Y та Z (табл. 3).

Геодезична основа є визначальним фактором точності мобільного лазерного сканування. Координати опорних точок необхідні для прив'язки результатів SLAM-знімання до державної системи УСК-2000, що дозволяє трансформувати хмару точок із локальної системи приладу в єдиний координатний простір. Без такої прив'язки неможливо побудувати коректний топографічний план або інтегрувати отримані дані з наявними картографічними матеріалами.

Таблиця 3. Каталог координат опорних пунктів геодезичної основи

Опорні пункти	Планові координати, м		Висотні координати, м
	X	Y	Z
1	299947.648	5583566.763	179.622
2	299958.074	5583495.410	179.366
3	300024.306	5583496.715	179.241
4	300079.380	5583501.750	178.879
5	300089.231	5583592.416	179.549
6	300011.262	5583586.245	179.554

Водночас ці пункти слугують основою для контролю геометричних параметрів. Вони дозволяють виявити та компенсувати систематичні похибки, які накопичуються алгоритмами SLAM під час руху, а також забезпечують точне зшивання окремих сканів у суцільний масив [22].

3.3. Польові роботи із застосуванням SLAM

Для безперервного та якісного знімання виконали комплекс підготовчих робіт. Оскільки територію стадіону НУБіП України детально вивчили за картами та під час попереднього рекогносрування, додаткове обстеження місцевості не знадобилося. На основі зібраних матеріалів заздалегідь розробили маршрут руху оператора. Траєкторію спланували так, щоб забезпечити достатнє перекриття

суміжних проходів сканера та регулярно фіксувати контрольні точки геодезичної основи [20].

Перед самим виходом на майданчик підготували обладнання: зібрали сканувальну систему SLAM R100, перевірили роботу всіх компонентів і підключили контролер до сканера через Bluetooth (рис.18). Сканування почали з першої опорної точки геодезичної основи – це необхідно для подальшої прив'язки у просторі та контролю точності (рис. 19). Далі налаштували параметри знімання для відкритої місцевості та запустили систему (рис. 20).



Рисунок 18. Підготовка та складання мобільного лазерного сканера SLAM R100 перед початком польових робіт.



Рисунок 19. Встановлення сканера SLAM R100 на початковій опорній точці геодезичної основи.

Траєкторію сканування планували з урахуванням щільної забудови та специфіки рельєфу стадіону НУБіП України. Велика кількість об'єктів інфраструктури, різновисотних споруд і вертикальних елементів створюють

складне просторове середовище. Для повного охоплення території та уникнення «сліпих зон», маршрут оператора прокладали з особливою деталізацією.



Рисунок 20. Ініціалізація системи та початок формування хмари точок у програмному забезпеченні сканера.

Особливості рельєфу та архітектури трибун вимагали окремого планування маршруту. При загальному рівнинному характері стадіону спостерігається ухил поверхні з північного заходу на південний схід. Відповідно, північні трибуни розташовані на природному насипі, а південні – спираються на штучні залізобетонні конструкції. Такі багаторівневі елементи обмежують видимість сканера й утворюють чорні плями. Для забезпечення суцільного

покриття та уникнення пропусків у геопросторових даних траєкторію оператора проклали з обох боків споруд. Це дозволило детально зафіксувати всі конструктивні елементи стадіону.

Після завершення підготовки та ініціалізації обладнання розпочали безпосереднє сканування стадіону. На початковій точці виконали прив'язку приладу SLAM R100 до геодезичного пункту з відомими координатами. Це дозволило зорієнтувати систему в державній геодезичній мережі та забезпечити збирання геоприв'язаних даних (рис. 21). Під час руху сканер безперервно фіксував просторову інформацію, а тривимірна хмара точок автоматично візуалізувалася на екрані контролера в ході руху оператора (рис. 22).



Рисунок 21. Контроль проходження опорних точок та моніторинг процесу сканування в програмному забезпеченні SLAM R100.



Рисунок 22. Формування хмари точок у режимі реального часу під час мобільного лазерного сканування.

Спланована траєкторія руху суцільно охопила територію стадіону та мінімізувала ефект дрейфу алгоритмів SLAM. На першому етапі виконали обхід по периметру спортивного ядра, зафіксувавши футбольне поле, бігові доріжки, трибуни та прилеглу зону. Зважаючи на багаторівневу конструкцію трибун,

знімання виконували як з боку поля, так і з тильного боку споруд. Для підвищення точності застосували замикання контурів маршруту з повторним фіксуванням контрольних геодезичних пунктів. Цей методичний прийом дозволяє компенсувати накопичені похибки позиціонування та стабілізувати просторову модель території.

Наступним етапом знімання була західна частина спорткомплексу НУБіП України (рис. 23), яка охоплює відкриті площинні спортивні споруди, зони відпочинку, бювет, дорожньо-стежкову мережу, а також навколишню забудову з навчальним корпусом № 9. Польові роботи проведено 26 вересня 2025 року; загальна тривалість лазерного сканування становила 50-60 хвилин

Під час знімання мобільна система безперервно реєструвала просторові дані, фіксуючи геометрію об'єктів, траєкторію руху та показники інерціального модуля. Отриманий масив польових матеріалів реалізує повний потенціал технології SLAM, тобто детальне тривимірне відображення місцевості. Сформована хмара точок у поєднанні з координатами контрольних пунктів



Рисунок 23. Виконання мобільного лазерного сканування території стадіону НУБіП України за допомогою сканера SLAM R100.

забезпечує основу для оцінки точності, моделювання рельєфу та створення топографічного плану.

3.4. Особливості збору даних у складних умовах

На точність мобільного лазерного сканування із технологією SLAM впливає комплекс апаратних та зовнішніх чинників. Серед технічних параметрів ключовими є похибка далекоміра, стабільність інерціального модуля, щільність сканування та ефективність алгоритмів обробки даних. Водночас геометрія маршруту безпосередньо визначає якість побудови траєкторії. Застосування замкнених контурів і повторних проходів дозволяє компенсувати дрейф системи й мінімізувати накопичення просторових похибок [28].

Ефективність алгоритмів SLAM безпосередньо залежить від характеру навколишнього середовища. Вони працюють стабільно на ділянках із чіткими геометричними орієнтирами: будівлями, огорожами, опорами освітлення та елементами благоустрою. Натомість одноманітні відкриті простори, рухомі об'єкти, щільна рослинність і різкі перепади висот погіршують якість знімання. Такі чинники обмежують поле зору сканера, що призводить до збоїв у локалізації системи [7, 17].

У процесі мобільного лазерного сканування у хмарі точок виникають шуми та артефакти, які викривляють геометрію місцевості. Ці поодинокі або групові випадкові відбиття з'являються внаслідок реєстрації рухомих об'єктів, людей, рослинності чи дзеркальних поверхонь. Для усунення таких похибок на етапі камеральної обробки виконують обов'язкову фільтрацію масиву даних [7, 38].

Найбільш критичною для технології SLAM є похибка дрейфу траєкторії – поступове накопичення зміщень у координатах сканера під час руху. Цей зсув виникає внаслідок мікропохибок інерціального модуля, неточностей алгоритмів послідовного зшивання сканів або дефіциту чітких просторових орієнтирів. Дрейф спричиняє деформацію та розходження суміжних ділянок хмари точок, що спотворює кінцеву модель. Для нівелювання цього ефекту під час знімання

обов'язково замикають маршрути в петлі, виконують повторні проходи та фіксують пункти опорної геодезичної мережі, завдяки чому алгоритм автоматично коригує накопичені похибки [28, 45].

Ефективність мобільного лазерного сканування визначається зовнішніми умовами та організацією польових робіт. Оптимальну точність вимірювань забезпечує суха погода за відсутності опадів чи туману. Також критично важливим є мінімальний рух пішоходів і транспорту в зоні сканування, що мінімізує кількість динамічних перешкод [6, 8].

Стабільна робота алгоритмів SLAM вимагає постійної наявності чітких просторових орієнтирів, тому точність моделі підвищують оптимізацією геометрії маршруту. З цією метою траєкторію проєктують із обов'язковим перекриттям суміжних проходів, замиканням контурів та регулярним фіксуванням контрольних пунктів. Водночас жорстка геодезична прив'язка до опорної мережі ліквідує внутрішні деформації хмари точок і забезпечує її трансформацію в єдину державну систему координат. Дотримання цієї технології дозволяє застосовувати результати SLAM-знімання для створення великомасштабних топографічних планів.

3.5. Порівняння SLAM з традиційними методами

Для об'єктивного зіставлення мобільного лазерного сканування SLAM із традиційними геодезичними методами застосовують уніфіковану систему критеріїв. Головними показниками ефективності є швидкість польового знімання, трудовитрати, щільність і деталізація даних, специфіка організації робіт на об'єкті, кінцева точність вимірювань та тривалість камеральної обробки [26]. Таке порівняння дозволяє чітко визначити межі застосування кожного підходу й обґрунтувати доцільність їх впровадження для створення топографічних планів [6].

Ключовою перевагою технології SLAM є висока продуктивність польового етапу. На відміну від електронного тахеометра, що потребує поштучної фіксації кожної пікетної точки, мобільний сканер безперервно збирає

просторові дані під час руху оператора [41, 47]. Це суттєво скорочує час перебування на об'єкті, що особливо ефективно на ділянках із високою щільністю інфраструктурних елементів.

Суттєвою перевагою методу є висока щільність отриманих даних. Традиційне топографічне знімання фіксує лише характерні точки та контури об'єктів, тоді як технологія SLAM формує масив із мільйонами просторових координат. Така інформаційна насиченість детально відтворює рельєф і складні елементи інфраструктури, що дозволяє створити точний цифровий двійник території [6, 20].

Крім того, мобільні системи значно компактніші та автономніші. Для зйомки потрібен лише один оператор із легким комплектом обладнання. Тахеометричний же метод часто вимагає роботи пари спеціалістів, постійного вибору та перестановки станцій, що ускладнює логістику й знижує продуктивність [23].

Продуктивність технології найвища на об'єктах зі складною геометрією. Умовна обмеженість простору, наявність щільної забудови, огорожень чи інженерних споруд роблять тахеометричне знімання надто трудомістким [26]. Натомість мобільне сканування дозволяє оперативно отримати вичерпну просторову інформацію без поштучного вимірювання кожного елемента [20]. Це визначає мобільне лазерне сканування як оптимальний метод для фіксації інфраструктурних об'єктів складної конфігурації.

Поруч із перевагами, технологія SLAM має кілька критичних обмежень, якщо порівнювати її з класичною геодезією. Головний недолік – накопичення помилок у координатах під час руху приладу [28]. Якщо тахеометр фіксує кожен пікет безпосередньо від пунктів геодезичної основи, то точність SLAM напряму залежить від протяжності маршруту, геометрії петель та наявності замкнених контурів.

Якість хмари точок суттєво залежить від конфігурації оточуючого простору. Дефіцит чітких просторових орієнтирів, протяжні одноманітні площини або помилки у траєкторії оператора порушують роботу алгоритмів

локалізації [45]. Це спричиняє розшарування або зсув суміжних ділянок моделі, тоді як на традиційні геодезичні методи геометрія об'єктів не чинить такого критичного впливу [22].

Іншою специфікою є формування надлишкових масивів інформації. На відміну від компактних файлів електронного тахеометра чи GNSS-приймача, мобільне сканування генерує масиви з мільйонами просторових координат [20]. Для їхнього очищення, класифікації та урівнювання необхідні високі обчислювальні потужності, спеціалізоване програмне забезпечення та часові витрати на камеральну обробку [6].

Технологія SLAM не є повністю автономною у просторі. Для трансформації отриманих даних у державну систему координат із дотриманням нормативної точності необхідне інтегрування супутникових GNSS-приймачів у режимі RTK або координування опорних пунктів електронним тахеометром [22]. Отже, мобільне лазерне сканування не замінює традиційні геодезичні вимірювання, а функціонує максимально ефективно лише в комбінації з ними.

Цей метод найефективніший там, де класичні методи геодезії стикаються з труднощами: на ділянках зі складною геометрією, у заплутаних лабіринтах вулиць чи серед щільної міської забудови. Мобільне сканування дозволяє швидко оновлювати топографічні плани, моделювати рельєф, проводити інженерні вишукування та інвентаризувати інфраструктуру без поштучних ручних вимірів [15, 20]. Здатність миттєво збирати мільйони просторових координат в умовах обмеженого простору робить цей метод одним із найперспективніших рішень сучасного прикладного картографування.

РОЗДІЛ 4. ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ І СТВОРЕННЯ ТОПОГРАФІЧНОГО ПЛАНУ

4.1. Первинне опрацювання SLAM-даних

Польовий етап завершився формуванням повного пакету вихідних матеріалів для подальшого опрацювання. Цей комплекс включав отримані дані лазерного сканування, зафіксовану траєкторію оператора, записи інерціального модуля та супутні фотоматеріали з об'єкта. Загальний обсяг вихідних даних становив близько 5 ГБ. Усі файли були структуровані у вигляді єдиного польового проєкту та імпортовані до спеціалізованого програмного забезпечення.

Первинну постобробку польових матеріалів виконано у фірмовому програмному забезпеченні SLAM GO POST, розробленому спеціально для лінійки сканерів SLAM R100. Такий підхід забезпечує повну сумісність із сирими файлами приладу та дозволяє автоматизувати перші етапи обробки даних [1]. Тривалість первинної постобробки становила орієнтовно 1,5 години, упродовж яких було виконано розрахунок траєкторії руху сканера, побудову первинної хмари точок та її геометричне узгодження.

Після формування первинної хмари точок виконується оптимізація даних для підвищення їхньої геометричної точності та підготовки до подальшого моделювання. Програма автоматично узгоджує взаємне положення сканів на основі фінальної траєкторії, що мінімізує внутрішні деформації моделі [20].

У процесі цієї постобробки реалізуються такі базові процедури:

- 1) Фільтрація шумів: видалення випадкових точок і відбиттів, спричинених рухомістю об'єктів або специфічною відбивною здатністю поверхонь.
- 2) Згладжування артефактів: усунення локальних геометричних спотворень для фінального вирівнювання траєкторії.
- 3) Прорідження масиву: зменшення щільності точок для оптимізації розміру файлу без втрати деталізації та геометрії об'єктів.

Одночасно контролюється повнота покриття стадіону для виключення «сліпих зон» або пропусків даних. На виході формується очищена та геометрично скоригована хмара точок обсягом близько 3,15 ГБ (рис. 24).

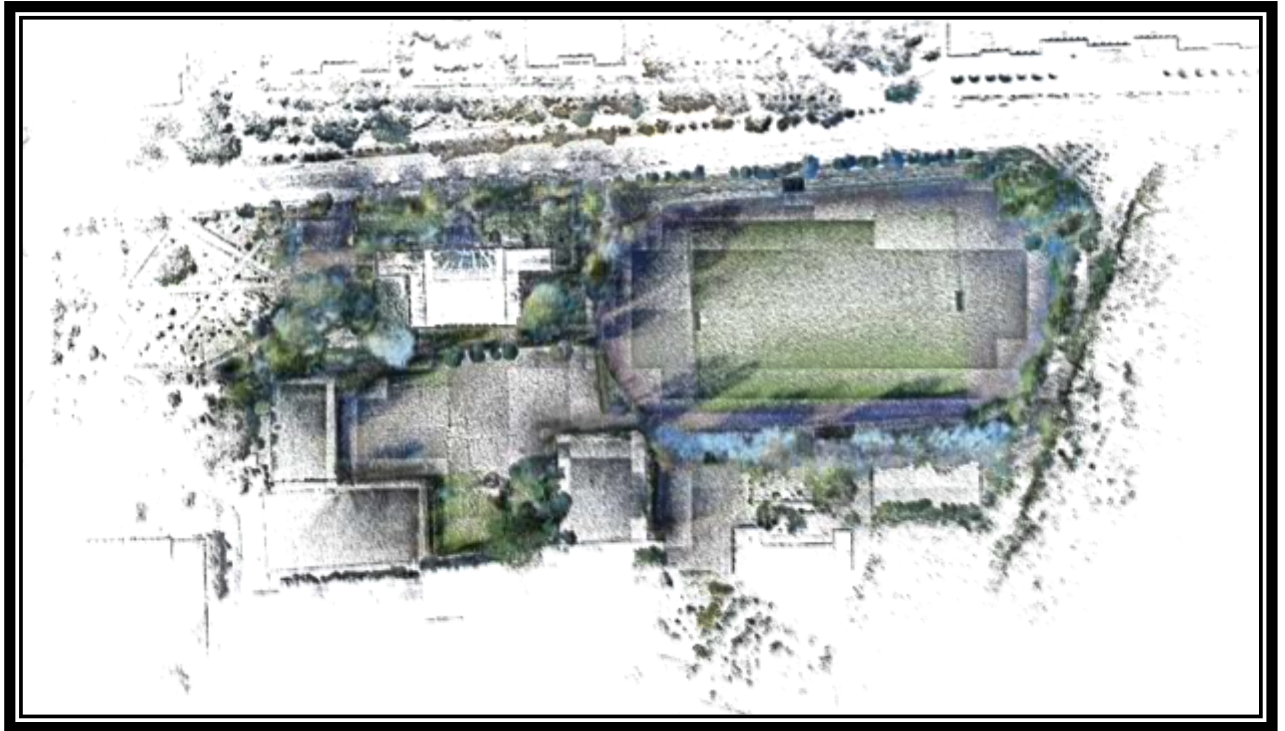


Рис. 24. Результат первинної обробки даних, отриманих за допомогою SLAM R100

Таким чином, отриманий масив є основою для класифікації рельєфу, дешифрування ситуації та створення топографічного плану масштабу 1:2000 [6, 20].

4.2. Побудова цифрової моделі місцевості

Побудова цифрової моделі місцевості (ЦММ) – це головний етап камеральної обробки, який дозволяє перевести тривимірний рельєф стадіону у цифровий формат. Модель потрібна для висотного аналізу, автоматичного трасування горизонталей та точного перенесення відміток на майбутній топографічний план [23, 30].

Моделювання базувалося на геоприв'язаній хмарі точок, попередньо очищеній від шумів, випадкових відбиттів та артефактів. Це дозволило отримати впорядкований масив просторових координат для побудови цифрової моделі місцевості (рис. 25) [6].

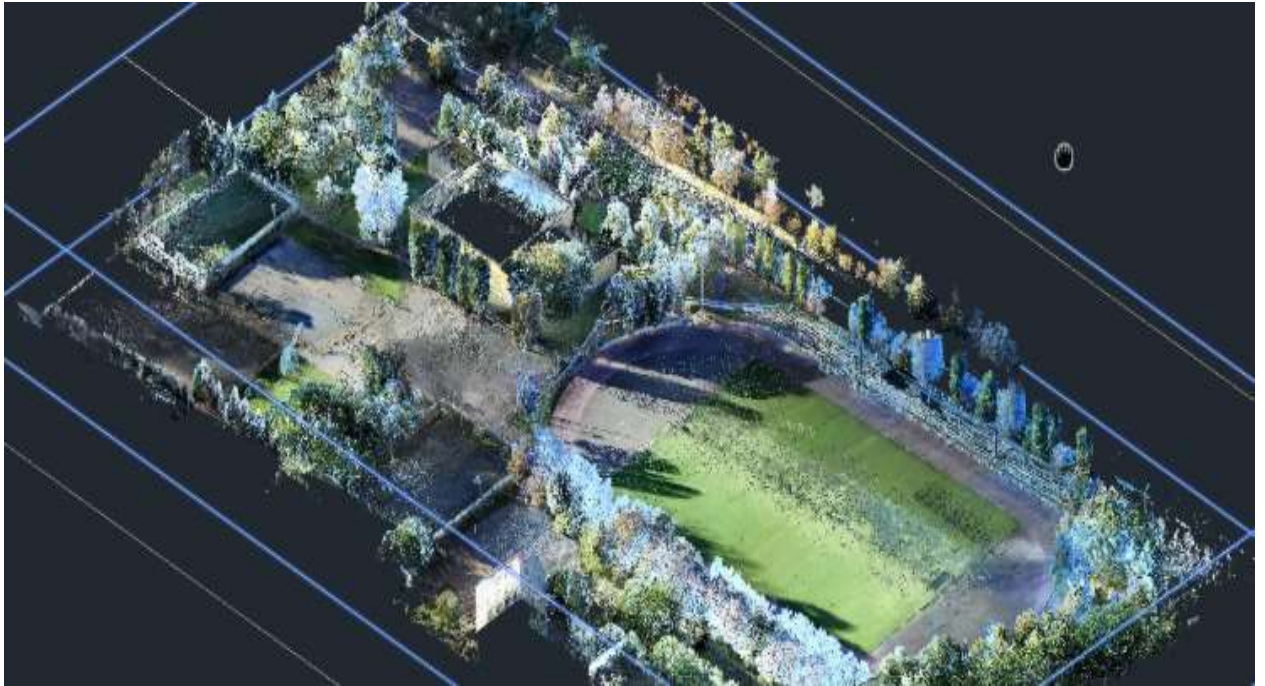


Рис. 25. Фрагмент геоприв'язаної хмари точок території стадіону НУБіП України після первинного опрацювання

Камеральне опрацювання даних, що охоплювало аналіз точок, моделювання рельєфу, інтерполяцію горизонталей, векторизацію об'єктів та фінальне оформлення топографічного плану, виконали в програмному середовищі AutoCAD 2022.

Ключова технологічна особливість цього етапу полягала в оптимізації камеральних робіт шляхом відмови від повної автоматичної класифікації масиву. Оскільки спортивне ядро стадіону є відкритим простором без густої рослинності чи щільної забудови, застосування складних алгоритмів автоматичного розпізнавання було неефективним. Замість цього для контролю геометричних параметрів поверхні будували поздовжні та поперечні профілі (зрізи) хмари точок. Такі вертикальні розрізи забезпечили наочну перевірку висотного

положення кожної ділянки, що дозволило оперативно усунути залишкові похибки й побудувати коректну цифрову модель рельєфу.

Завдяки інструментам просторового аналізу та візуалізації нам вдалося побудувати точну цифрову модель місцевості стадіону НУБіП України. Вона коректно відтворює висотні характеристики як футбольного поля, так і складніших навколишніх ділянок. На основі цієї моделі ми розробили систему горизонталей, які наочно передають пластику рельєфу та відображають його реальну висотну структуру (рис. 26).

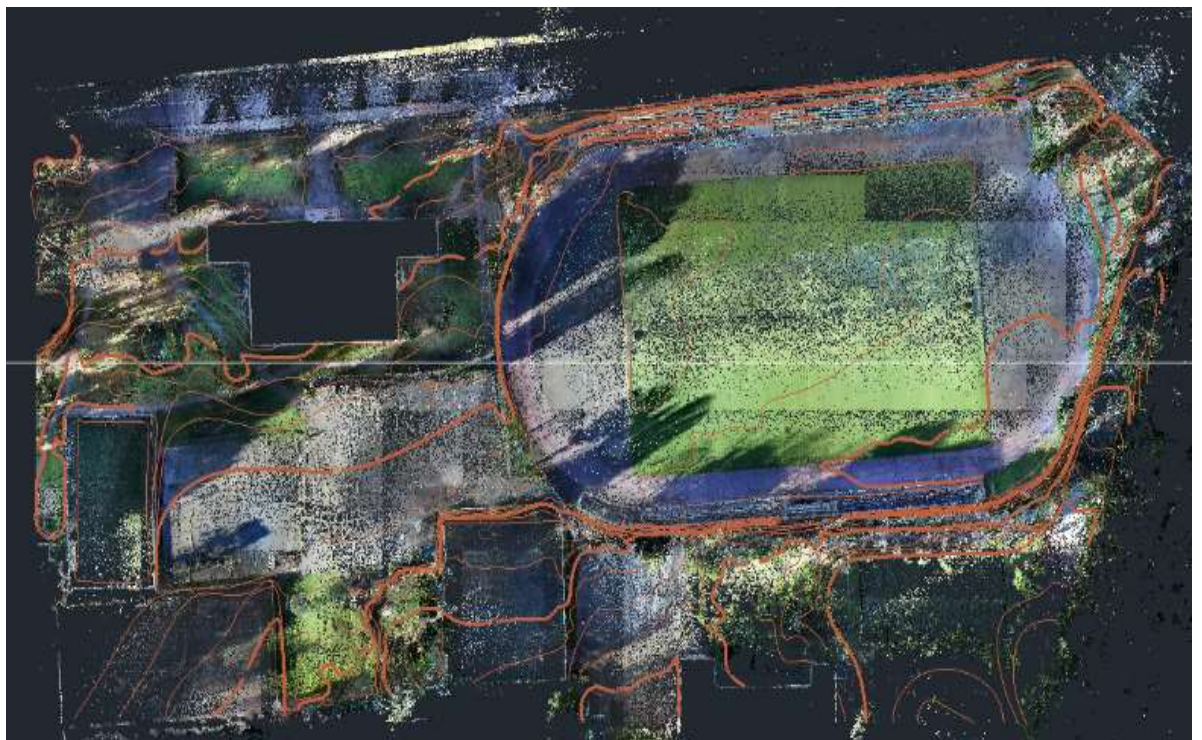


Рис. 26. Цифрова модель місцевості території стадіону НУБіП України із нанесеними горизонталями

Таким чином, отримані тривимірні дані забезпечили необхідну детальність поверхні для вирішення всіх інженерно-геодезичних завдань і стали основою для креслення топографічного плану масштабу 1:2000.

4.3. Векторизація та класифікація об'єктів

Сама по собі хмара точок – це лише масив «сирих» просторових координат, який відображає геометрію об'єктів. Попри високу детальність, працювати з таким набором некоординованих пікетів для створення топопланів незручно, адже в ньому немає структурованого поділу за типами об'єктів. Через це наступним камеральним кроком є класифікація масиву та його векторизація [20].

Класифікація дозволяє розділити точки за категоріями, а векторизація – перетворити тривимірні обриси на лінійні та контурні цифрові об'єкти. У результаті ми розносимо елементи ситуації по тематичних шарах. Це дозволяє чітко відмалювати будівлі, споруди, дорожню мережу та зелені насадження у суворій відповідності до діючих умовних знаків і нормативних вимог [6, 30].

Контури об'єктів виділяли шляхом візуального дешифрування геоприв'язаної RGB-хмари точок. Розпізнавання елементів ситуації базувалося на їхній геометрії, просторовому положенні, формі та розмірах. Наявність реального кольору суттєво спростила ідентифікацію: різні типи покриттів і деталі благоустрою чітко диференціювалися за відтінками та текстурою [9, 20].

Для точного визначення меж складних об'єктів будували горизонтальні й вертикальні профільні зрізи масиву даних. Це дозволило пошарово проаналізувати просторову структуру стадіону, відокремити наземну ситуацію від елементів, розташованих над поверхнею землі, та проконтролювати правильність цифрування. Остаточну верифікацію спірних елементів виконували шляхом зіставлення хмари точок із фото- та відеоматеріалами, зафіксованими на об'єкті під час польового етапу.

Під час аналізу хмари точок ми виділили всю ключову ситуацію, необхідну для топоплану стадіону НУБіП України. Сюди увійшли капітальні будівлі, трибуни, огорожі, проїзди й стежки, футбольне поле із суміжними спортмайданчиками, а також дерева, газони та інші елементи благоустрою. Усі ці об'єкти ми цифрували за чіткими контурами, що простежувалися у масиві даних і відповідали вимогам деталізації для масштабу 1:2000 (табл.4).

Водночас на хмарі було добре видно дрібний спортінвентар та малі архітектурні форми. Однак через їхні незначні габарити, мобільність та низьку картографічну значущість ми не виносили їх на план [30]. Таке рішення повністю відповідає правилам картографічної генералізації: на планах цього масштабу відображають лише капітальні та постійні об'єкти, які мають практичне значення і не перевантажують креслення.

Таблиця 4. Критерії дешифрування та векторизації деяких елементів ситуації

Об'єкт	Ознаки розпізнавання в хмарі точок	Особливості векторизації	Фото
Будівлі	Чіткі прямолінійні контури, вертикальні стіни, плоска покрівля	Векторизація по зовнішньому контуру	
Трибуни	Ступінчаста структура, характерні перепади висот	Відображення контурів споруди	
Дерева	Нерегулярна форма крони, розріджена внутрішня структура	Позначення окремими умовними знаками	

Асфальтові покриття	Однорідний колір та рівна поверхня	Векторизація по межах покриття	
Газони	Рівномірне зелене забарвлення та відсутність вертикальних елементів	Відображення контуром	
Огорожі	Вузькі лінійні елементи вздовж меж території	Векторизація лінійними об'єктами	

За результатами камеральних робіт сформовано цифрові контури території стадіону НУБіП України та прилеглих ділянок (рис.27).

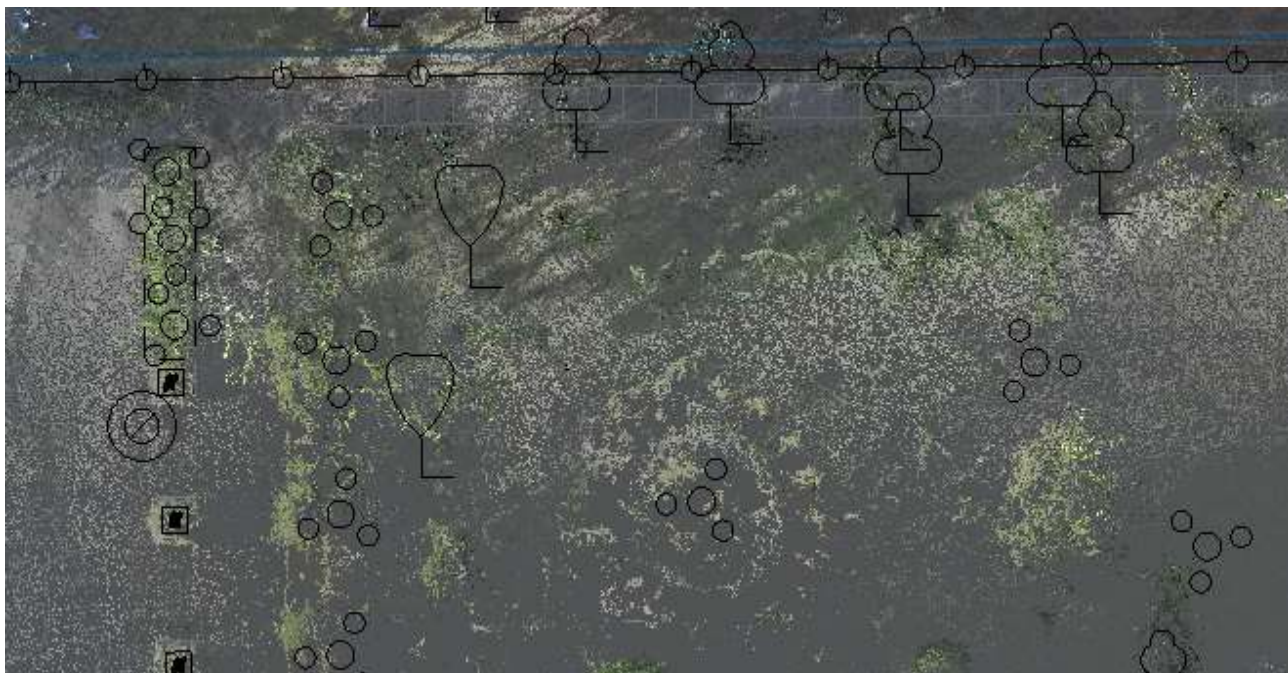


Рис. 27. Фрагмент векторизації об'єктів ситуації за даними геоприв'язаної хмари точок у середовищі AutoCAD 2022

Отримані векторні дані впорядковано за тематичними шарами, що забезпечило структурування просторової інформації та дозволило підготувати графічні матеріали для остаточного оформлення топографічного плану масштабом 1:2000.

4.4. Створення топографічного плану масштабу

На основі сформованої цифрової моделі місцевості та векторних контурів розробляється структура підсумкового топографічного плану. Усі просторові дані об'єднуються у межах єдиного картографічного документа в AutoCAD. Для забезпечення читабельності плану розділяються елементи рельєфу та ситуації за тематичними шарами, суворо дотримуючись вимог чинних умовних знаків для топографічних планів масштабу 1:2000 [30, 44].

Рельєф місцевості відображено за допомогою горизонталей, на основі створеної цифрової моделі. Щоб детально показати всі особливості стадіону, було обрано висоту перерізу рельєфу 0,25 м. Це дозволило мені чітко передати як рівне поле самого стадіону, так і різкі перепади висот у районі трибун та навколо них. Готовий топографічний план повністю відображає рельєф і ситуацію досліджуваної ділянки, тому його можна використовувати для будь-яких подальших геодезичних чи землепорядних розрахунків.

Кінцеве оформлення топографічного плану масштабу 1:2000 виконано відповідно до вимог чинних «Умовних знаків для топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500» [44]. Математичну основу документа забезпечує координатна сітка з кроком 10 см (що в масштабі плану відповідає 200 м на місцевості), лінії якої викреслено тонкими суцільними хрестиками із підписами значень координат по краях рамки [33]. Картографічне зображення обмежено внутрішньою рамкою, навколо якої сформовано стандартне позарамкове оформлення, включаючи числове та лінійне вираження масштабу, а також штамп установленого зразка у правому нижньому куті аркуша [30].

Матеріали орієнтовано в державній системі координат УСК-2000 та Балтійській системі висот, що гарантує сумісність результатів з іншими геодезичними, картографічними та кадастровими даними [32, 33, 35]. Крім того, підписи позначок висот геодезичних пунктів, пікетів та горизонталей винесено на план з урахуванням нормативних вимог щодо шрифтів, кольорів та їхнього центрування відносно об'єктів [44].

Внаслідок знімання та камеральної обробки створено актуальний топографічний план стадіону НУБіП України й прилеглої території загальною площею 3,5 га. На плані зафіксовано фактичне положення елементів спортивної інфраструктури, капітальних споруд, дорожньо-стежкової мережі, огорожень, об'єктів благоустрою та масивів зелених насаджень [30, 44]. Під час векторизації просторові дані розподілили за геометричним типом на площинні, лінійні та точкові компоненти для точного відтворення ситуації на місцевості [20].

Розроблений топографічний план і цифрова модель місцевості масштабу 1:2000 території стадіону НУБіП України мають безпосереднє прикладне значення. Результати роботи згруповано за трьома основними напрямками практичного застосування:

1) Інженерно-будівельний напрям (реконструкція та мережі). Матеріали слугують геодезичною основою для розробки проєктно-кошторисної документації під час модернізації спортивного ядра стадіону, ремонту трибун і допоміжних споруд. Дані необхідні для проєктування нових інженерних комунікацій, ремонту мереж водопостачання та закритого дренажу поля [42, 48].

2) Планувально-господарський напрям (благоустрій). Детальна фіксація доріжкової мережі, меж зелених насаджень та елементів освітлення дозволяє планувати заходи з благоустрою та заміни покриття. Структура цифрових даних сумісна з вимогами містобудівного кадастру для інтеграції в документацію університету та Голосіївського району [10, 34, 36].

3) Інформаційно-моніторинговий напрям (оновлення та контроль). План забезпечує оперативну актуалізацію застарілих картографічних фондів на досліджувану ділянку площею 3,5 га. Створена цифрова основа дозволяє здійснювати просторовий моніторинг території, відстежувати появу нових об'єктів та оцінювати деформації існуючих покриттів [6, 35, 37].

4.5 Оцінка точності та якості отриманих результатів

Оцінка точності геодезичної основи є обов'язковим етапом для підтвердження надійності геометричних параметрів цифрової моделі та топографічного плану [30, 33]. Якість сформованого масиву просторових координат визначається похибками вимірювання опорних пунктів мережі. Контроль метричних характеристик дозволяє встановити відповідність результатів вимогам інструкцій та підтвердити придатність планово-картографічних матеріалів для подальшого інженерного проєктування [23, 46].

Основним інструментом координування опорної мережі на об'єкті дослідження виступив метод супутникових GNSS -вимірювань. Оскільки

визначення координат пунктів виконувалося без проведення повторних незалежних спостережень, апріорну оцінку точності планового положення виконано на основі паспортних і нормативних характеристик застосованого методу [1, 39]. Лінійні параметри мережі розраховувались за формулою (табл. 5):

$$d = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

Таблиця 5. Координати опорних точок та довжини сторін геодезичної мережі

Опорні пункти	Планові координати, м		Висотні координати, м	Довжини ліній, м
	X	Y	Z	d
1	299947.648	5583566.763	179.622	
				72.11
2	299958.074	5583495.410	179.366	
				66.25
3	300024.306	5583496.715	179.241	
				55.30
4	300079.380	5583501.750	178.879	
				91.20
5	300089.231	5583592.416	179.549	
				78.21
6	300011.262	5583586.245	179.554	
				24.42

Приклад розрахунку (між пунктами 1-2):

$$\begin{aligned}
 d_{1-2} &= \sqrt{(299958.074 - 299947.648)^2 + (5583495.410 - 5583566.763)^2} \\
 &= \sqrt{(10.426)^2 + (-71.353)^2} = \sqrt{108.7 + 5091.25} = \sqrt{5199.95} \\
 &= 72.11\text{м}
 \end{aligned}$$

Середня довжина сторін:

$$d_{\text{сер}} = \frac{72,11 + 66,25 + 55,3 + 91,2 + 78,21 + 24,42}{6} = \frac{387,49}{6} = 64,6 \text{ м}$$

Для GNSS-знімання прийнята середньоквадратична похибка планового положення точок (м) становить $\pm 0,03$ м [1]. Для характеристики якості побудованої мережі обчислено її відносну точність за формулою:

Отримане значення відносної похибки мережі

$$\frac{m}{d_{\text{сер}}} = \frac{0.03}{64.6} = 0.000464$$

Отримане значення відносної похибки мережі 0,000464 повністю задовольняє вимоги чинного Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 [33]. Оскільки фактична відносна помилка не перевищує встановлений норматив, тобто $0,03 > 0,000464$ – тому побудована опорна геодезична мережа повністю відповідає вимогам для створення топографічних планів не лише заданого масштабу 1:2000, а й більш великих масштабів (зокрема 1:500). Це свідчить про високу якість отриманих результатів і достатній запас точності для виконання подальших інженерних робіт.

Якість результатів мобільного лазерного сканування оцінювались шляхом візуального аналізу повноти покриття, щільності точок та чіткості відображення контурів [20]. Завдяки замкнутим контурам траєкторії та фіксації на контрольних точках під час знімання, накопичення похибок було мінімізовано [38]. У результаті значних розривів чи втрати просторових даних на території стадіону та прилеглих ділянках не виявлено.

Поодинокі шуми та артефакти, характерні для мобільного сканування, були усунуті під час первинної обробки. Підсумкова щільність хмари точок забезпечила чітке розпізнавання споруд, трибун, покриття, огорожень і зелених насаджень [6]. Сформований масив даних є повністю достатнім за повнотою та деталізацією для побудови цифрової моделі місцевості й оформлення топоплану масштабу 1:2000.

Оскільки опорні GNSS-пункти безпосередньо задіяні в алгоритмі трансформації та геоприв'язки хмари точок SLAM, вони не можуть слугувати основою для незалежного контролю точності. З огляду на це, оцінку метричної якості кінцевої цифрової моделі виконано аналітичним розрахунком сумарної похибки, яка складається з точності супутникових вимірювань та внутрішньої геометричної похибки алгоритму SLAM [22, 23].

Математичне обґрунтування точності базується на таких вихідних параметрах:

Середньоквадратична похибка GNSS RTK-позиціонування опорних точок: $\pm 0,03$ [39];

Типова внутрішня абсолютна похибка побудови просторової моделі технологією SLAM: $\pm 0,05 - 0,10$ м [22].

Розрахунок граничної сумарної похибки кінцевого результату виконано за класичною формулою підсумовування випадкових векторних помилок (приймавши мінімальний поріг для SLAM) [23]:

$$m = \sqrt{0.03^2 + 0.05^2} = 0.058 = 0.06 \text{ м}$$

Отримане значення сумарної похибки моделі 0,06 суттєво менше за граничний допуск чинного Порядку топографічної зйомки, згідно з яким середня помилка визначення положення предметів та контурів місцевості відносно найближчих пунктів геодезичної основи для масштабу 1:2000 не повинна перевищувати ± 1 м (на незабудованій території) та $\pm 0,4$ м (у районах із капітальною забудовою) [33]. Таким чином, точність отриманих матеріалів повністю відповідає нормативним вимогам для створення топографічних планів масштабу 1:2000.

Проведена оцінка точності та якості даних підтверджує, що створений топографічний план детально та достовірно відтворює рельєф і ситуацію стадіону НУБіП України. Нанесені площинні, лінійні та точкові об'єкти за рівнем деталізації повністю відповідають нормативним вимогам до масштабу 1:2000 [30, 33].

Отримані результати є готовою основою для вирішення подальших інженерно-геодезичних, проєктних чи землепорядних завдань університету. Усі поставлені на етапі камеральної обробки завдання були виконані. Фінальний результат доводить високу ефективність технології SLAM та мобільного лазерного сканування для оперативного збору й оновлення актуальної геопросторової інформації.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі нами розв'язано прикладне науково-технічне завдання зі створення актуального топографічного плану масштабу 1:2000 території стадіону Національного університету біоресурсів і природокористування України із застосуванням технології мобільного лазерного сканування на основі алгоритмів SLAM.

У роботі проаналізовано нормативно-правове забезпечення топографо-геодезичної діяльності в Україні, зокрема закони «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність», «Про національну інфраструктуру геопросторових даних», «Про Державний земельний кадастр» та Порядок топографічної зйомки в масштабі 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500 [33]. Попри відсутність окремих профільних норм для SLAM-знімання, технологія є ефективною та придатною до використання за умови дотримання загальних вимог до точності топографо-геодезичних робіт.

Для дослідження обрали територію спорткомплексу НУБіП України у Києві по вулиці Героїв Оборони, 18. Об'єкт розташований на ділянці площею 13,1045 га (кадастровий номер 8000000000:79:306:0003). Топографічне знімання виконали на площі близько 3,5 га, яка охоплює футбольне поле з біговими доріжками, трибуни, спортмайданчики, навчальний корпус № 9, а також проїзди, пішохідні зони та зелені насадження.

Під час аналізу природних умов та архівних картографічних матеріалів різних років з'ясувалося, що наявні плани застаріли й потребують просторового оновлення. Це завдання набуває особливої ваги, оскільки НУБіП України бере участь у міжнародних науково-освітніх проєктах, зокрема за програмою Erasmus+, які передбачають модернізацію інфраструктури та впровадження ГІС-технологій для управління територіями.

Для виконання польового етапу робіт використано мобільний лазерний сканер SLAM R100 та GNSS-приймач ALFAGEO PLUS RTK. Геодезичну основу створено шляхом визначення координат опорних пунктів методом супутникових вимірювань у режимі RTK. Створена мережа забезпечила надійну координатну

прив'язку результатів лазерного сканування до державної системи координат та висот. Польовий етап робіт тривав близько 50–60 хвилин, що дозволило забезпечити повне покриття території дослідження та сформувати щільну просторову хмару точок.

Камеральна обробка 5 ГБ отриманих даних тривала 1,5 години й охоплювала геоприв'язку, фільтрацію шумів, класифікацію об'єктів, а також побудову цифрової моделі місцевості та векторизацію елементів рельєфу й ситуації. У результаті було сформовано цифрову модель території об'ємом 3,1 ГБ та створено топографічний план масштабу 1:2000, на якому детально відображено спортивні споруди, проїзди, пішохідні зони, інженерні мережі, елементи благоустрою та зелені насадження.

Математична оцінка точності підтвердила, що створена методом GNSS RTK геодезична основа повністю задовольняє жорсткі нормативні вимоги для знімання у цьому масштабі. Візуальний та метричний аналіз хмари точок разом із результатами векторизації довели високу якість і повноту зібраних просторових даних, що гарантує достовірність усього картографічного матеріалу.

Практичне значення роботи полягає у створенні актуального цифрового топографічного плану території стадіону НУБіП України, який може використовуватися як інженерно-геодезична основа для реконструкції спортивного комплексу, розроблення проєктів благоустрою, виконання містобудівних робіт, проведення інженерних вишукувань та актуалізації просторових даних університетського кампусу.

Отримані результати підтвердили високу ефективність технології SLAM для знімання об'єктів спортивної інфраструктури. Порівняно з традиційними геодезичними методами, мобільне лазерне сканування дозволило суттєво скоротити польовий етап і швидко зібрати великий обсяг просторових даних. Створені цифрова модель та топографічний план мають пряме прикладне значення для НУБіП України: вони є готовою інженерною основою для інтеграції в геоінформаційні системи, планування реконструкції стадіону,

розробки проєктів благоустрою чи будь-яких подальших містобудівних і геодезичних вишукувань на цій ділянці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. AlphaGeo GeoPuls [Електронний ресурс] // System Solutions. URL: <https://systemnet.com.ua/product/alphageo-geopuls/> (дата звернення: 04.06.2026).
2. GEOPOINT 2026 : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, 5–6 березня 2026 р., м. Київ. Київ : НУБіП України, 2026. 433 с. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/rich_text_files/Geopoint_Zbirnyk_tez_2026.pdf (дата звернення: 07.06.2026).
3. Google Maps [Електронний ресурс]. URL: <https://www.google.com/maps/> (дата звернення: 04.06.2026).
4. Ievsiukov T., Kovtun V., Dorosh L., Kutsenko O., Matviichuk D. Innovative approaches to creating a register of especially valuable nature protection objects using slam and 3D scanning technologies In Proceedings of the International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024", Volume 2024, pp. 1-5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510052> <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2024/10/GeoTerrace-2024-052.pdf>
5. Kovalchuk I., Ievsiukov T., Kutsenko O., Kozhemiako M. Application of laser scanning for modeling cultural heritage objects In Proceedings of the International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2025", Volume 2025, pp. 1-5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/09/GeoTerrace-2025-069.pdf>
6. Maset E., Matellon A., Gubiani S., Visintini D., Beinat A. Introducing SLAM-Based Portable Laser Scanning for the Metric Testing of Topographic Databases // Remote Sensing. 2025. Vol. 17, No. 19. Article 3316. DOI: 10.3390/rs17193316. URL: <https://doi.org/10.3390/rs17193316> (дата звернення: 04.06.2026).
7. SLAM-знімання: принцип, історія розвитку та перспективи інтеграції [Електронний ресурс]. URL:

<https://geoshop.com.ua/statti/oglyadi/tehnologii/osnovi-slam-znimannya-yak-pratsyue-pobudova-karti-pid-chas-ruhu> (дата звернення: 04.06.2026).

8. Біват А., Кондратюк І., Лісогор М., Назарчук Н., Бочко О., Закревський О. Удосконалення інженерно-геодезичних методів вивірки фундаментів та обладнання за допомогою наземного лазерного сканування // GEOFORUM'2025 : матеріали 28-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 9–11 квітня 2025 р., Львів–Брюховичі, Україна. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2025. С. 230–233. URL: https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/%D0%A2%D0%95%D0%97%D0%98_%D0%93%D0%95%D0%9E%D0%A4%D0%9E%D0%A0%D0%A3%D0%9C_2025.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

9. Горковчук Ю. В., Горковчук Д. В., Куліченко Н. В. Дослідження крену споруди баштового типу методом наземного лазерного сканування // Інженерна геодезія : наук.-техн. зб. Київ : Київський національний університет будівництва і архітектури, 2018. Вип. 65. С. 209–216. URL: <http://oldlibrary.knuba.edu.ua/books/zbirniki/10/201865.pdf> (дата звернення: 04.06.2026).

10. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій // Єдина державна електронна система у сфері будівництва. URL: <https://e-construction.gov.ua/files-token/5af99ebb09a2a9a29e4265e446b51344> (дата звернення: 31.05.2026)

11. ДБН В.2.2-13-2003. Спортивні та фізкультурно-оздоровчі споруди. Зміна № 1 // Єдина державна електронна система у сфері будівництва. URL: <https://e-construction.gov.ua/files-token/8935899bb3603d04ad7a602e0f07341a> (дата звернення: 31.05.2026)

12. ДБН В.2.2-3:2018. Будинки і споруди. Заклади освіти : зі Зміною № 2. Київ : Мінрегіон України, 2022. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dbn_v.2.2-3_2018_zi_zminoyu_no_1_ta_zminoyu_no_2.pdf (дата звернення: 31.05.2026)

13. ДБН В.2.2-40:2018. Інклюзивність будівель і споруд : зі Зміною № 1. Київ : Мінрегіон України, 2022. URL: <https://e-construction.gov.ua/files-token/081aa832b284d32bef9ab1ae93556db1> (дата звернення: 31.05.2026)
14. Дерев'янюк В. В. Використання новітніх приладів для потреб геодезичного забезпечення відведення земельних ділянок / наук. кер. Шевчук С. М. // Агроландшафти: інноваційні підходи у землеустрої та садово-парковому господарстві : збірник статей III Всеукраїнської науково-практичної конференції, присвяченої 125-річчю від дня народження академіка М. М. Гришка, 22 квітня 2026 р., м. Полтава. Полтава : Полтавський державний аграрний університет, 2026. С. 278–282. URL: <https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/node/16002/agrolandshaftyzbirnykstateykviten2026compressed2.pdf> (дата звернення: 04.06.2026).
15. Євсюков Т.О., Куценко О.О. Перспективи інтеграції технології SLAM у геоінформаційну систему Державного земельного кадастру. Матеріали 28-ї Міжнародної науково-технічної конференції "GEOFORUM'2025", 9-11 квітня 2025 р., Львів-Брюховичі. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2025. - Режим доступу: https://zgt.com.ua/wpcontent/uploads/2025/03/ТЕЗИ_ГЕОФОРУМ_2025.pdf, вільний. - Заголовок з екрана. - Мова укр. і англ. - С. 94-97 ISBN 978-966-994-029-2
16. Євсюков Т., Куценко О. Інноваційні підходи до обліку та оцінки лісових ресурсів на основі SLAM-технології (на прикладі Ботанічного саду НУБіП України) // Тези доповідей Міжнародної конференції «Land Unity Summit 2025», 11–12 вересня 2025 р., Івано-Франківськ. Івано-Франківськ : Видавництво ІФНТУНГ, 2025. С. 123–126. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/rich_text_files/%D0%97%D0%91%D0%86%D0%A0%D0%9D%D0%98%D0%9A_%D0%A2%D0%95%D0%97_LAND_UNITY_SUMMIT.pdf (дата звернення: 04.06.2026).
17. Жарков А. В., Маслій Р. В. Застосування алгоритму Visual Inertial SLAM для навігації автономного робота // Моделювання та комп'ютерна графіка : матеріали конференції MCCS-2024. URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mccs/mccs2024/paper/viewFile/22172/19026> (дата звернення: 04.06.2026).

18. Земельний кодекс України : Закон України від 25.10.2001 № 2768-III // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14> (дата звернення: 31.05.2026)

19. Кадастрова карта України [Електронний ресурс]. URL: <https://kadastrova-karta.com/> (дата звернення: 04.06.2026).

20. Кінь Д. О., Лазоренко Н. Ю., Карпінський Ю. О., Скорик М. А., Медведський Ю. В. Методика застосування SLAM-технології у топографічному картографуванні // Просторовий розвиток. 2025. № 15. С. 610–626. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.15.610-626.

21. Кліматичні дані по Києву [Електронний ресурс] / Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. URL: <https://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-dani-po-kyievu> (дата звернення: 04.06.2026).

22. Ковтун В., Лиско Б., Куценко О., Пилип'юк Р. Дослідження точності визначення просторового положення об'єктів методом SLAM-сканування // Геофорум-2024 : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Львів, 2024. С. 27–29. URL: https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2024/04/%D0%A2%D0%95%D0%97%D0%98_%D0%93%D0%95%D0%9E%D0%A4%D0%9E%D0%A0%D0%A3%D0%9C_2024.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

23. Ляшенко Д., Малік Т., Гордєєв А. Геодезія. Частина 1 / за заг. ред. В. І. Зацерковного. Київ : Навчально-науковий інститут «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2025. URL: http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/Geodesy_1_2025.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

24. **Магістри землевпорядники переконані, що поле стадіону НУБіП України потребує реконструкції [Електронний ресурс] / Національний**

університет біоресурсів і природокористування України. URL: *посилання на сторінку*(дата звернення: 04.06.2026).

25. Машина часу і простору [Електронний ресурс] / Державний політехнічний музей імені Бориса Патона при НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». URL: <https://museum.kpi.ua/map/> (дата звернення: 04.06.2026).

26. Медведський Ю., Нестрига А. Порівняння SLAM-сканування та наземного лазерного сканування // GEOFORUM'2025 : матеріали 28-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 9–11 квітня 2025 р., Львів–Брюховичі, Україна. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2025. С. 81–82. URL: https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/%D0%A2%D0%95%D0%97%D0%98_%D0%93%D0%95%D0%9E%D0%A4%D0%9E%D0%A0%D0%A3%D0%9C_2025.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

27. Навігація SLAM та її вплив на робототехніку [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mecalux.com/blog/slam-navigation-robotics> (дата звернення: 04.06.2026).

28. Невлюдов І., Новоселов С., Сухачов К. Метод одночасної локалізації та картографування для побудови 2,5D-карти навколишнього середовища засобами ROS // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2023. № 2 (24). С. 145–160. DOI: 10.30837/ITSSI.2023.24.145. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/d64cf19b-ebcf-4413-a068-51d4b3963f5f/content> (дата звернення: 04.06.2026).

29. Одночасна локалізація та картографування (SLAM) [Електронний ресурс]. URL: <https://www.advancednavigation.com/glossary/slam/> (дата звернення: 04.06.2026).

30. Основні положення створення топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. ГКНТА-2.04-02-98. Київ : Головне управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України, 1998. URL: https://gki.com.ua/files/uploads/documents/Norms/Ukrgeodesykart_norms/3_1994.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

31. Положення про політику використання штучного інтелекту у Національному університеті біоресурсів і природокористування України. СУ СМЯ НУБіП України 7.5-021-011. Київ : Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2024. 15 с. URL:

<https://nubip.edu.ua/sites/default/files/official/2025-08/%D0%A1%D0%A3-%D0%A1%D0%9C%D0%AF-%D0%9D%D0%A3%D0%91%D1%96%D0%9F-%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8-7.5-021-011.pdf> (дата звернення: 04.06.2026).

32. Про Державний земельний кадастр : Закон України від 07.07.2011 № 3613-VI // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17> (дата звернення: 31.05.2026)

33. Про затвердження Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 : наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 17.04.2025 № 1675 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0868-25> (дата звернення: 31.05.2026)

34. Про затвердження Правил утримання зелених насаджень у населених пунктах України : наказ Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України від 10.04.2006 № 105 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0880-06> (дата звернення: 31.05.2026)

35. Про національну інфраструктуру геопросторових даних : Закон України від 13.04.2020 № 554-IX // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20> (дата звернення: 31.05.2026)

36. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text> (дата звернення: 31.05.2026)

37. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність : Закон України від 23.12.1998 № 353-XIV // База даних «Законодавство України» /

Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14> (дата звернення: 31.05.2026)

38. Розуміння технології SLAM: посібник з одночасної локалізації та картографування [Електронний ресурс]. URL: <https://www.emesent.com/blog/understanding-slam-technology-a-guide-to-simultaneous-localization-and-mapping> (дата звернення: 04.06.2026).

39. Рошин В., Бурашніков О., Шелепало С., Бойко О. Дослідження можливостей застосування технології GNSS RTK при виконанні завдань інженерної підтримки дій військ (сил) оборони України // GEOFORUM'2025 : матеріали 28-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 9–11 квітня 2025 р., Львів–Брюховичі, Україна. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2025. С. 142–150. URL: https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/%D0%A2%D0%95%D0%97%D0%98_%D0%93%D0%95%D0%9E%D0%A4%D0%9E%D0%A0%D0%A3%D0%9C_2025.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

40. Студентський простір [Електронний ресурс] / Національний університет біоресурсів і природокористування України. URL: <https://nubip.edu.ua/studentskyy-prostir> (дата звернення: 04.06.2026).

41. Технологія SLAM і ручний сканер CHCNAV RS10 [Електронний ресурс]. URL: <https://geotrend.com.ua/statti/tekhnologiya-slam-i-ruchnii-skaner-chcnav-rs10> (дата звернення: 04.06.2026).

42. Топографічне знімання М1:500 | Дніпро. МЕЖА : геодезична компанія. URL: <https://meja.com.ua/topografichne-znimannya/> (дата звернення: 04.06.2026)

43. Топографічні карти [Електронний ресурс]. URL: <https://uk-ua.topographic-map.com/> (дата звернення: 04.06.2026).

44. Умовні знаки для топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 [Електронний ресурс]. URL: https://gki.com.ua/files/page/Um_znaki_5000-500_St360-413.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

45. Усов О. С. Методи візуальної SLAM для навігації у внутрішньому середовищі без доступу до глобального позиціонування // Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація. 2025. № 3, ч. 2. С. 411-418. DOI: 10.32782/2663-5941/2025.3.2/54. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2025/3_2025/part_2/56.pdf (дата звернення: 04.06.2026).
46. Цицюра Я. Г. Геодезія з основами землевпорядкування : конспект лекцій для студентів спеціальностей 6.090101 «Агрономія», 6.090103 «Лісове і садово-паркове господарство» денної та заочної форм навчання. Вінниця : Вінницький національний аграрний університет, 2015. 175 с. URL: <https://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/8280.pdf> (дата звернення: 04.06.2026).
47. Що таке SLAM і чому це прорив у мобільному картографуванні [Електронний ресурс]. URL: <https://systemnet.com.ua/novini/shcho-take-slam-i-chomu-tse-proryv-u-mobilnomu-kartohrafuvanni/> (дата звернення: 04.06.2026).
48. Що таке топографічна зйомка земельної ділянки? [Електронний ресурс]. URL: <https://landinvest.pro/blog/shho-take-topografichna-zjomka/> (дата звернення: 04.06.2026).
49. Які прилади використовують сучасні геодезисти: функції та переваги / УкрГеоКарт : геодезія та землеустрій. URL: <https://ukrgeokart.com.ua/uk/statti/yaki-priladi-vikoristovuyut-suchasni-geodezisti-funktsiyi-ta-perevagi/> (дата звернення: 04.06.2026).