НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет землевпорядкування

ПОГОДЖЕНО	**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**
Декан факультету землевпорядкування	**Завідувач кафедри геодезії та картографії**
_____ Олександр ШЕВЧЕНКО	**_____ Тарас ЄВСЮКОВ**
(підпис)	(підпис)
«____»_____ 2026 р.	«____»_____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Створення топографічного плану масштабу 1:500 на частину земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 з використанням технології SLAM»

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Освітньо-професійна програма «Геодезія та землеустрій»

Гарант освітньої програми «Геодезія та землеустрій», д. геогр. н., професор (науковий ступінь та вчене звання)	_____ (підпис)	Іван КОВАЛЬЧУК
Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи, д.е.н., проф. (науковий ступінь та вчене звання)	_____ (підпис)	Тарас ЄВСЮКОВ
Виконав	_____ (підпис)	Єлизавета КУШНІР

КИЇВ - 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет землевпорядкування

ЗАТВЕРДЖУЮ

в.о. завідувача кафедри

геодезії та картографії

проф., д-р екон. наук _____ Тарас ЄВСЮКОВ

«____»_____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Кушнір Єлизаветі Юріївні

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»;

Освітньо-професійна програма «Геодезія та землеустрій» виробнича;

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи

«Створення топографічного плану масштабу 1:500 на частину земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 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: матеріали топографо-геодезичних вишукувань, результати SLAM-зйомки, ортофотоплани і матеріали попередніх років на об’єкт дослідження, дані Державного земельного кадастру, відомості про земельну ділянку з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008, нормативно-правові документи у сфері топографо-геодезичної та землевпорядної діяльності.

Перелік питань, що потрібно дослідити:

1. Теоретичні основи застосування технології SLAM у топографо-геодезичних роботах.
2. Характеристика об'єкта дослідження та аналіз вихідних даних.
3. Створення топографічного плану масштабу 1:500 на частину земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 з використанням технології SLAM.

Дата видачі завдання “28” листопада 2025 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи (проєкту) _____ (підпис) Тарас ЄВСЮКОВ

Завдання взяв до виконання _____ (підпис) Єлизавета КУШНІР

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 70 стор., 2 табл., 19 рис., 1 схемакомп'ютерне 3D-моделювання., 26 джерел.

Мета роботи: дослідження теоретико-методичних засад та практичне виконання мобільного лазерного сканування на основі технології SLAM для отримання просторових геоданих, побудови тривимірної моделі території Національного університету біоресурсів і природокористування (НУБіП) України та аналізу якості отриманих просторових даних при формуванні цифрової моделі території.

Об'єкт дослідження: частина території земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 (з розміщеними на ній будівлями і спорудами зокрема студентські гуртожитки НУБіП України №2, №3, №8, футбольний майданчик №2, котельня №3 і душовий павільйон).

Предмет дослідження: технологічні особливості мобільного лазерного сканування SLAM-технології при створенні топографічного плану масштабу 1:500 на частину земельної ділянки.

Методи дослідження: При підготовці бакалаврської кваліфікаційної роботи нами було використано такі методи наукових досліджень: монографічний (огляд науково-технічної літератури та нормативно-правової бази), синтезу (при опрацюванні результатів топографічного знімання, картографічних матеріалів попередніх років на об'єкт дослідження), методи індукції та дедукції, метод порівняння (при аналізі й порівнянні картографічних матеріалів попередніх років з результатами топографічного знімання), метод вимірювання, методи математичного вирівнювання траєкторій, фільтрації та класифікації хмар точок, комп'ютерне 3D-моделювання та векторизація.

Результати та їх новизна: У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи проведено комплекс інженерно-геодезичних робіт, за результатами яких створено цифровий топографічний план масштабу 1:500 на

частину земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008. Доведено, що застосування SLAM-технології суттєво мінімізує трудовитрати, потребу в інструментальних засобах та оптимізує весь цикл створення цифрових двійників об'єктів.

Рекомендації щодо використання: відпрацьована методика сканування та отримані тривимірні просторові дані можуть бути впроваджені у виробничу діяльність землевпорядних та геодезичних організацій, а також використані для інформаційного забезпечення проєктів реконструкції, ландшафтного планування та благоустрою території досліджуваної ділянки НУБіП України.

Ключові слова: технологія SLAM, мобільне лазерне сканування, хмара точок, тривимірне моделювання, топографічний план, масштаб 1:500, оцінка якості, FJDynamics Trion P2, НУБіП України.

ABSTRACT

Text part of the qualification work for obtaining the Bachelor's degree: 70 pages, 2 tables, 19 figures, 1 diagram, 26 sources.

Purpose of the study: to investigate the theoretical and methodological foundations and the practical implementation of mobile laser scanning based on SLAM technology for the acquisition of spatial geodata, the creation of a three-dimensional model of the territory of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (NULES of Ukraine), and the analysis of the quality of the obtained spatial data in the process of generating a digital terrain model.

Research object: a part of the land parcel with cadastral number 8000000000:79:301:0008, including the buildings and structures located on it, namely student dormitories No. 2, No. 3, and No. 8 of NULES of Ukraine, Football Field No. 2, Boiler House No. 3, and a shower pavilion.

Research subject: technological features of mobile laser scanning based on SLAM technology for the creation of a 1:500 scale topographic plan of a part of the land parcel.

Research methods: The following scientific research methods were used in the preparation of the bachelor's qualification thesis: the monographic method (review of scientific and technical literature and regulatory framework); synthesis (processing of topographic survey results and cartographic materials from previous years related to the study object); methods of induction and deduction; the comparative method (analysis and comparison of previous cartographic materials with the results of topographic surveying); measurement methods; methods of mathematical trajectory adjustment, point cloud filtering and classification; computer-based 3D modeling; and vectorization.

Results and scientific novelty: As a result of the bachelor's qualification thesis, a complex of engineering and geodetic works was carried out, resulting in the creation of a digital topographic plan at a scale of 1:500 for a part of the land parcel with cadastral number 8000000000:79:301:0008. It has been demonstrated that the use of SLAM technology significantly reduces labor costs, decreases the need for traditional

surveying instruments, and optimizes the entire process of creating digital twins of objects.

Recommendations for application: The developed scanning methodology and the obtained three-dimensional spatial data can be implemented in the professional activities of land management and geodetic organizations, as well as used for information support of reconstruction projects, landscape planning, and improvement of the studied area within NULES of Ukraine.

Keywords: SLAM technology, mobile laser scanning, point cloud, three-dimensional modeling, topographic plan, 1:500 scale, quality assessment, FJDynamics Trion P2, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (NULES of Ukraine).

ЗМІСТ

ВСТУП……...…….... 12

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ТА НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ТОПОГРАФІЧНИХ ПЛАНІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ SLAM…….. 16

1.1. Сучасні методи топографічної зйомки……. 16

1.2. Сутність і принцип роботи технології SLAM…….. 18

1.3. Нормативно-правове та методичне забезпечення топографічної зйомки масштабу 1:500…….. 20

1.4. Порівняльний аналіз сучасних технологій виконання топографічної зйомки……..... 22

1.5. Методика виконання топографічної зйомки з використанням технології SLAM……. 27

Висновки до розділу 1……... 28

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ВИКОНАННЯ ТОПОГРАФІЧНОЇ ЗЙОМКИ…….....30

2.1. Фізико-географічна і містобудівна характеристика об’єкта дослідження……... 30

2.2. Аналіз вихідних геодезичних і картографічних матеріалів попередніх років……... 32

2.3. Технічне та програмне забезпечення виконання робіт…… 37

2.4. Підготовка та організація польових робіт…… 41

2.5. Технологічний процес виконання зйомки з використанням технології SLAM……. 43

2.6. Фотофіксація та схема виконання польових робіт……..… 46

Висновки до розділу 2……..…… 52

РОЗДІЛ 3. ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗЙОМКИ ТА СТВОРЕННЯ ТОПОГРАФІЧНОГО ПЛАНУ МАСШТАБУ 1:500……. 55

3.1. Камеральне опрацювання результатів SLAM-зйомки……..…. 55

3.2. Створення цифрової моделі місцевості та 3D-моделі об’єкта……..….. 56

3.3. Створення топографічного плану масштабу 1:500……..…… 57

3.4. Практичні рекомендації щодо використання технології SLAM у топографо-геодезичних роботах……..…….... 60

Висновки до розділу 3……..……. 61

ВИСНОВКИ……. 63

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……. 65

ДОДАТОК А……. 70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

AutoCAD – система автоматизованого проєктування для створення та редагування креслень

Bluetooth – бездротова технологія передачі даних між пристроями

CAD (Computer-Aided Design) – автоматизоване проєктування

DEM (Digital Elevation Model) – цифрова модель рельєфу

DTM (Digital Terrain Model) – цифрова модель місцевості

ESRI (Environmental Systems Research Institute) – компанія-розробник геоінформаційного програмного забезпечення

FJD – виробник геодезичного обладнання та систем лазерного сканування

GIS / ГІС – геоінформаційна система

GNSS (Global Navigation Satellite System) – глобальна навігаційна супутникова система

IMU (Inertial Measurement Unit) – інерціальний вимірювальний модуль

LAS – універсальний формат зберігання хмар точок лазерного сканування

LiDAR (Light Detection and Ranging) – технологія лазерного сканування та вимірювання відстаней

Loop Closure – алгоритм замикання траєкторії для компенсації накопичених похибок

Multi-SLAM Fusion – алгоритм об’єднання даних LiDAR, GNSS та IMU для побудови траєкторії

PLY – формат зберігання тривимірних моделей і хмар точок

PPK (Post Processed Kinematic) – метод постобробки супутникових GNSS-вимірювань

RCP (ReCap Project) – формат проєкту Autodesk ReCap для роботи з хмарами точок

RGB (Red, Green, Blue) – колірна модель цифрових зображень

RTK (Real Time Kinematic) – метод супутникового позиціонування в реальному часі з високою точністю

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – технологія одночасної локалізації та побудови карти

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) – безпілотний літальний апарат

USB – універсальний послідовний інтерфейс передачі даних

Wi-Fi – бездротова мережна технологія

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ГІС – геоінформаційна система

ДЗК – Державний земельний кадастр

НПП – національний природний парк

РЕБ – радіоелектронна боротьба

САПР – система автоматизованого проєктування

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю

ВСТУП

Сучасний розвиток геодезії та землеустрою характеризується переходом від класичних методів вимірювань до інтегрованих цифрових технологій збору, опрацювання та аналізу просторових даних. Збільшення потреби в актуальних просторових даних і великих обсягів інженерних і будівельних робіт потребують застосування сучасних підходів до виконання топографічних зйомок, зокрема цифрового картографування, мобільного лазерного сканування та автоматизованої обробки хмар точок [1, 18, 26]. Традиційні методи топографічного знімання, що базуються на використанні електронних тахеометрів та супутникових GNSS-технологій, залишаються актуальними, однак характеризуються значними витратами часу при виконанні детальних знімань великого масштабу, зокрема 1:500. Крім того, в умовах воєнного стану користувачі супутникових GNSS-технологій можуть стикатися з проблемами нестабільності, спотворення або втрати супутникового сигналу, що знижує надійність координатних визначень і підвищує актуальність використання автономних або комбінованих технологій збору просторових даних [14, 26]. Особливо це проявляється при обстеженні територій зі складною планувальною структурою, наявністю значної кількості інженерних об’єктів та обмеженим доступом до супутникового сигналу. У зв’язку з цим особливого значення набувають методи мобільного лазерного сканування, що базуються на використанні технології SLAM. Зазначена технологія дозволяє здійснювати одночасне визначення положення сенсора та побудову тривимірної моделі навколишнього середовища у реальному часі без необхідності створення щільної опорної геодезичної мережі на етапі польового збору даних [8, 17, 26].

Використання технології SLAM у поєднанні з сучасними методами обробки координатної інформації дозволяє автоматизувати процес формування топографічної основи, забезпечити високу щільність вимірювань та підвищити інформативність кінцевих результатів. Формування хмари точок у реальному часі створює передумови для оперативного контролю якості знімання, виявлення пропусків даних та коригування процесу польових робіт безпосередньо під час

їх виконання [1, 8, 18, 19]. Інтеграція результатів SLAM-сканування з координатними даними табличної форми забезпечує поєднання високої деталізації просторових вимірювань із контрольованою точністю геодезичної основи, що є необхідною умовою створення достовірних топографічних матеріалів. У даній роботі розглядається застосування сучасних технологій мобільного лазерного сканування для створення топографічного плану масштабу 1:500 на частину земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008. Використання SLAM-технології у даному контексті дозволяє підвищити ефективність виконання топографо-геодезичних робіт, забезпечити високу деталізацію просторових даних та сформувати цифрову модель території, що відповідає сучасним вимогам інженерної геодезії та кадастрового забезпечення.

Актуальність. Зростання вимог до точності та інформативності топографічних матеріалів у сучасній інженерній практиці зумовлює необхідність удосконалення підходів до виконання геодезичних знімань великого масштабу. Особливо це стосується планів масштабу 1:500, де відображення навіть дрібних елементів ситуації потребує високої щільності вимірювань і надійної координатної основи. За таких умов ефективність традиційних методів значною мірою залежить від складності території та організації польових робіт, що може призводити до збільшення трудових витрат і часу виконання. У складних умовах, зокрема в межах щільної забудови або на територіях із обмеженим доступом, доцільним є застосування мобільних методів збору просторової інформації. Одним із таких підходів є використання лазерного сканування на основі алгоритмів SLAM, які забезпечують побудову тривимірної моделі середовища разом із визначенням траєкторії руху сканера. Такий принцип роботи дозволяє отримувати дані у безперервному режимі, що формує значний обсяг вимірювань і підвищує повноту охоплення території. Отримані в результаті сканування масиви даних характеризуються високою щільністю та деталізацією, що створює передумови для більш точного відтворення просторової структури об’єктів. Водночас важливим етапом є інтеграція цих даних із координатною основою та

їх подальша обробка, оскільки саме узгодженість координат визначає достовірність побудови топографічного плану. Це особливо актуально при роботі з великими обсягами інформації, де виникає потреба у контролі точності та усуненні можливих відхилень.

Таким чином, застосування технологій мобільного лазерного сканування у поєднанні з методами обробки координатної інформації дозволяє підвищити ефективність виконання топографо-геодезичних робіт, забезпечити необхідний рівень точності та скоротити тривалість отримання результатів. Це обґрунтовує доцільність використання SLAM-технології при створенні топографічних планів масштабу 1:500.

Метою є дослідження можливостей та практичне застосування технологій мобільного лазерного сканування на основі SLAM для отримання просторових геоданих, побудови тривимірної моделі території та оцінки якості й точності результатів при створенні топографічного плану 1:500 частини території Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Завданням є аналіз сучасних технологій лазерного сканування методом SLAM. Дослідження можливостей і якості роботи ручного лазерного 3D LiDAR сканера FJD Trion P2. Виконання зйомки і отримання хмари точок на території з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008. Створення топографічного плану масштабу 1:500 по отриманим даним.

Об'єктом дослідження є частина території земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008, що охоплює забудовану територію гуртожитків НУБіП України №2, №8, №3, також футбольний майданчик №2, котельня №3, душовий павільйон.

Новизна/практичність: застосування новітніх технологій SLAM для створення цифрового топографічного плану масштабу 1:500 на частину земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008. У ході дослідження підтверджено ефективність використання SLAM для виконання інженерно-геодезичних робіт, зокрема щодо зменшення трудових витрат,

скорочення потреби в традиційних інструментальних засобах та оптимізації процесу створення цифрових моделей об’єктів.

При підготовці, написанні та оформленні бакалаврської кваліфікаційної роботи було використано Положення про бакалаврську кваліфікаційну роботу у Національному університеті біоресурсів і природокористування України, яке визначає структуру роботи, вимоги до оформлення, використання джерел та посилань у тексті [10]. Крім того, під час редагування окремих фрагментів тексту враховано вимоги Положення про політику використання штучного інтелекту у НУБіП України [11]. Інструменти на основі технологій штучного інтелекту застосовувалися як допоміжні засоби для перевірки орфографії та граматики тексту, а також для редагування та перекладу окремих фрагментів англійською мовою. Також автор висловлює вдячність керівнику компанії ТОВ «ГЕОФІКС» Олексію Куценку за наданий для проведення вишукувань лазерний 3D LiDAR-сканер FJD Trion P2, який використовувався під час виконання польових геодезичних робіт, а також співробітнику компанії – помічнику геодезиста Володимиру Бакаленку за допомогу у проведенні польових геодезичних вишукувань, збір вихідних даних та надання результатів обробки даних у вигляді хмари точок для подальшого опрацювання.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ТА НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ТОПОГРАФІЧНИХ ПЛАНІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ SLAM

1.1. Сучасні методи топографічної зйомки

Сучасний етап розвитку геодезичної науки, кадастрових систем та землевпорядного виробництва характеризується інтенсивним інтегруванням інноваційних цифрових технологій збору, автоматизованої обробки та комплексного аналізу просторових даних [1, 18, 26]. У сфері виконання інженерно-топографічних робіт дедалі ширшого практичного застосування набувають методи мобільного лазерного сканування, комп’ютерного зору, цифрової фотограмметрії, супутникового позиціонування та тривимірного комп'ютерного моделювання складних урбанізованих територій [8, 15, 16, 18, 22]. Необхідність оперативного отримання високоточної геопросторової інформації з максимальним рівнем деталізації об'єктів ситуації та рельєфу зумовлена актуальними потребами капітального будівництва, містобудівного проєктування, інформаційного забезпечення державного земельного кадастру, а також завданнями створення точних цифрових моделей місцевості та тривимірних метричних двійників елементів інфраструктури [6, 18, 24].

Класичні методи топографо-геодезичного знімання, до яких належать електронна тахеометрія та супутникові GNSS-вимірювання, залишаються базовими складовими сучасних інженерно-геодезичних вишукувань, забезпечуючи формування опорної розпланувальної основи та координування ключових точок місцевості [2, 12, 13]. Електронна тахеометрія базується на виконанні прямих лінійно-кутових вимірювань від пунктів геодезичної основи, що забезпечує високу геометричну точність та мінімальні похибки визначення просторового положення характерних точок, дозволяючи застосовувати цей метод під час створення топографічних планів усього масштабного ряду [2, 12].

Водночас виконання детального знімання значних за площею територій із високою щільністю забудови, складними архітектурними формами та великою кількістю дрібних елементів благоустрою супроводжується значними часовими витратами та суттєвим обсягом ручних вимірювальних процесів безпосередньо на польовому етапі робіт, що суттєво знижує загальну економічну ефективність виробництва [1].

Супутникові GNSS-технології забезпечують можливість оперативного визначення просторового положення об'єктів у єдиній державній системі координат і широко використовуються під час розгортання знімальних геодезичних мереж [4, 12]. Особливого поширення набули методи кінематики у реальному часі (RTK), які дозволяють фіксувати координати з сантиметровою точністю безпосередньо в процесі переміщення оператора [14, 19]. Проте загальна ефективність супутникового позиціонування суттєво знижується під впливом деструктивних чинників навколишнього середовища, зокрема в умовах щільної багатоповерхової забудови, на лісових або паркових територіях зі щільним рослинним покривом, а також поблизу високих інженерних споруд. У таких зонах виникає ефект екранування, затінення та багатошляховості радіосигналу, що унеможливлює отримання стабільного фіксованого рішення та призводить до зниження точності координатних визначень [14, 26].

У зв’язку з наявними обмеженнями традиційних підходів значного науково-технічного розвитку набули методи мобільного лазерного сканування, які базуються на використанні LiDAR-систем, інерціальних сенсорів, алгоритмів SLAM та інтегрованої обробки просторових даних [17, 18, 19, 26]. Ці технології забезпечують швидке отримання великих масивів просторових даних та автоматизоване формування тривимірних моделей територій. На відміну від традиційних дискретних методів, мобільне сканування дозволяє здійснювати безперервний збір просторових координат під час руху оператора або транспортної платформи, фіксуючи суцільні масиви геопросторових даних у вигляді надщільних хмар точок [14, 18, 23]. Проте для успішної реалізації кінематичного знімання в умовах відсутності або нестабільності супутникових

сигналів виникає потреба в автоматичній автономній орієнтації приладу, що забезпечується впровадженням технологій одночасної локалізації та побудови карти (SLAM) на основі комплексування даних лазерного сенсора, інерціальних вимірювальних блоків (IMU) та засобів комп'ютерного зору [15, 17, 25, 26].

1.2. Сутність і принцип роботи технології SLAM

Технологія SLAM (Simultaneous Localization and Mapping – одночасна локалізація та побудова карти) у сучасній інженерній геодезії розглядається як складний комплекс алгоритмічних рішень, що забезпечує паралельне вирішення задач визначення просторового положення рухомого сенсора та формування тривимірної моделі навколишнього середовища в режимі реального часу [8, 17, 26]. Математична концепція цієї технології полягає у вирішенні взаємопов'язаної двовекторної задачі, де точність визначення координат сканера безпосередньо залежить від геометрії побудованої карти, а коректність побудови карти обумовлена точністю знання просторових координат самого приладу. Ця взаємозалежність успішно долається за рахунок ітераційної математичної обробки послідовно виконуваних вимірювань, що дозволяє здійснювати високоточну побудову відносної просторової моделі без обов'язкового використання зовнішньої геодезичної опорної мережі на етапі безпосереднього виконання польових робіт [15, 26].

Математичне ядро технології базується на поєднанні процесів динамічного оцінювання траєкторії руху та картографування простору. Визначення просторового переміщення здійснюється шляхом зіставлення суміжних послідовних лазерних сканів, після чого верифіковані дані інтегруються у єдину модель. Для реалізації цього процесу застосовуються спеціалізовані алгоритми суміщення хмар точок, найбільш поширеними серед яких є метод ітераційних найближчих точок (ICP) та метод трансформації нормальних розподілів (NDT). Вони дозволяють обчислювати відносне зміщення між окремими циклами вимірювань, уточнювати траєкторію руху сенсора та мінімізувати похибки випадкового і систематичного характеру [17, 26].

Сучасні геодезичні SLAM-системи функціонують на основі принципу мультисенсорної інтеграції, що передбачає поєднання LiDAR-даних, інерціальних вимірювань, візуальної інформації та, за наявності стабільного сигналу, супутникового позиціонування [15, 17, 19, 25, 26]. Основним джерелом просторової геоінформації виступає лазерний LiDAR-сенсор, який генерує масивні хмари точок шляхом вимірювання відстаней до навколишніх поверхонь методом обчислення часу польоту світлового імпульсу [18, 26]. Інерціальний вимірювальний блок (IMU) здійснює безперервну реєстрацію кутових швидкостей та лінійних прискорень, забезпечуючи стабілізацію розрахункової траєкторії руху у просторі між послідовними циклами лазерних вимірювань [17, 25]. Додатково інтегровані візуальні сенсори у вигляді цифрових RGB-камер використовуються для оптимізації інтерпретації просторової сцени, фотограмметричного трекінгу об'єктів, візуально-інерційний SLAM-обробки та фотореалістичного текстурування хмари точок [15, 16, 17]. За наявності стійкого супутникового сигналу GNSS-модуль залучається для автоматизованої глобальної координатної прив'язки, проте його наявність не є критичним фактором для функціонування внутрішнього математичного алгоритму локалізації SLAM [14, 17, 19, 26].

Процес формування підсумкової тривимірної моделі складається з послідовного очищення первинних вимірювань від шумів, визначення вектора відносного переміщення сенсора між суміжними кадрами та інтеграції нових геоданих у загальну карту місцевості. Особливе значення у структурі алгоритму має процес автоматичного виявлення замкнутих контурів [15, 26].

Ця процедура забезпечує ідентифікацію раніше обстежених ділянок простору, що дозволяє алгоритму виконувати зворотне коригування накопичених похибок і мінімізувати ефект геометричного дрейфу траєкторії сканування при тривалих маршрутах [8, 17, 26].

1.3. Нормативно-правове та методичне забезпечення топографічної зйомки масштабу 1:500

Виконання топографо-геодезичних та картографічних робіт на території України регламентується ієрархічною системою нормативно-правових актів, державних стандартів та технічних інструкцій. Ця нормативна база визначає порядок проведення знімальних процесів, вимоги до точності геодезичних вимірювань, структури матеріалів, а також правила оформлення підсумкової технічної документації. Під час створення топографічних планів великого масштабу, зокрема 1:500, дотримання встановлених вимог щодо координатної прив'язки, точності та повноти відображення ситуації є обов'язковою умовою для їх подальшого використання у сфері містобудування, кадастру та проєктування [2, 12, 13].

У межах даного дослідження топографічна зйомка масштабу 1:500 виконувалася на території кадастрового номера 8000000000:79:301:0008 у місті Києві із застосуванням технології SLAM та мобільного лазерного сканування. При виконанні робіт забезпечувалась прив'язка отриманої хмари точок до Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 [4].

Базовим законодавчим актом у сфері топографо-геодезичної діяльності є Закон України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність», який встановлює правові, організаційні та технічні засади виконання геодезичних і картографічних робіт, а також визначає обов'язковість застосування державних стандартів, єдиних систем координат та забезпечення якості геопросторових даних [13]. Відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 22.09.2004 № 1259 усі види топографо-геодезичних робіт повинні виконуватися з використанням Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 або офіційно затверджених місцевих систем координат [4].

Технічні параметри, методики та нормативні допуски для виконання великомасштабних топографічних знімань визначені Порядком топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500, затвердженим наказом

Міністерства аграрної політики та продовольства України від 17.04.2025 № 1675 [12]. Відповідно до його вимог, топографічні плани масштабу 1:500 повинні забезпечувати високу деталізацію ситуаційних елементів, точне визначення координат характерних точок та повне відображення рельєфу, будівель, дорожньої мережі, елементів благоустрою й інженерної інфраструктури [12]. Відповідно до Порядку топографічної зйомки, на територіях з капітальною та багатоповерховою забудовою середня квадратична похибка взаємного положення точок найближчих контурів не повинна перевищувати 0,5 мм у масштабі плану. Для топографічного плану масштабу 1:500 це відповідає похибці 0,25 м на місцевості [12].

Загальні вимоги до виконання інженерно-геодезичних вишукувань для потреб будівництва та реконструкції регламентуються державними будівельними нормами ДБН А.2.1-1:2014 «Інженерні вишукування для будівництва» [2]. Цей документ визначає порядок виконання польових і камеральних робіт, вимоги до структури технічної документації та склад вишукувань залежно від технічного завдання.

Оскільки результати топографічної зйомки у межах даного бакалаврського дослідження призначені переважно для інформаційного забезпечення реконструкції наземних об’єктів та елементів благоустрою території, дослідження підземних інженерних мереж не включалося до програми робіт. Це пов’язано з тим, що їх визначення та інвентаризація потребує застосування спеціалізованих методів, зокрема георадарного зондування та виконавчих знімань інженерних комунікацій, які виходять за межі обраної технологічної схеми SLAM-знімання. Водночас слід зазначити, що відображення підземних комунікацій у складі топографічних планів масштабу 1:500 є обов’язковим елементом інженерно-геодезичних вишукувань у випадку комплексного проєктування та будівництва об’єктів [2, 12].

Додатково нормативними документами передбачено здійснення контролю якості топографо-геодезичних робіт з боку уповноважених органів, зокрема Держгеокадастру [3, 13]. Такий контроль включає перевірку дотримання

затверджених методик, використання сертифікованого та повіреного обладнання, а також відповідність отриманих результатів встановленим технічним вимогам [12, 13].

Для забезпечення сумісності створених цифрових матеріалів із сучасними геоінформаційними системами, державними кадастрами та містобудівними реєстрами процес моделювання геопросторових даних повинен відповідати вимогам ДСТУ 8774:2018 «Географічна інформація. Правила моделювання геопросторових даних» [5]. Це забезпечує можливість інтеграції результатів зйомки до Державного земельного кадастру, містобудівного кадастру та інших цифрових інформаційних систем.

Застосування сучасних технологій мобільного лазерного сканування та SLAM допускається за умови забезпечення надійної геодезичної прив'язки хмари точок до пунктів державної геодезичної мережі або опорної геодезичної основи [4, 12]. Такі технології дозволяють значно підвищити оперативність збору просторових даних при одночасному забезпеченні нормативної точності та достатньої повноти відображення об'єктів місцевості [1, 8, 26].

Таким чином, нормативно-правове та методичне забезпечення створює єдину систему вимог до виконання топографо-геодезичних робіт, гарантує достовірність отриманих результатів та забезпечує можливість їх подальшого використання для проєктування, реконструкції, ведення кадастрової документації та формування сучасних геоінформаційних ресурсів.

1.4. Порівняльний аналіз сучасних технологій виконання топографічної зйомки

Сучасний етап розвитку інженерної геодезії характеризується стрімкою трансформацією методичних підходів до збору геопросторової інформації – від дискретного накопичення окремих точок до суцільного високошвидкісного моделювання поверхонь на основі мобільного лазерного сканування та SLAM-алгоритмів [1, 8, 18, 26]. Вибір оптимального інструментарію для великомасштабного топографічного знімання безпосередньо впливає на

точність, економічну доцільність та часові витрати під час виконання польових і камеральних етапів робіт [1, 8, 18]. Для оцінки ефективності впровадження мобільного тривимірного лазерного сканування у межах цієї бакалаврської кваліфікаційної роботи проведено детальний порівняльний аналіз трьох провідних технологій: електронної тахеометрії, супутникових GNSS-RTK вимірювань та технології SLAM.

Метод електронної тахеометрії належить до класичних способів виконання топографічних знімань та базується на прямих лінійно-кутових вимірюваннях від пунктів геодезичної основи [2, 12, 13]. Головною перевагою методу є його еталонна точність (міліметровий рівень), що дозволяє чітко визначати просторове положення критично важливих елементів споруд. Проте електронна тахеометрія характеризується низькою швидкістю збору даних, високою трудомісткістю та необхідністю забезпечення безпосередньої прямої видимості між приладом і кожним пікетом, який фіксується геодезистом вручну [1, 8].

Технологія супутникової зйомки у режимі реального часу (GNSS-RTK) забезпечує високу швидкість отримання координат та дозволяє виконувати роботи силами одного виконавця, гарантуючи стабільну сантиметрову точність на значних площах без прокладання тахеометричних ходів [12, 14]. Головним деструктивним чинником для GNSS є жорстка залежність від конфігурації супутникових сузір'їв та стану атмосфери. В умовах щільної міської забудови («урбаністичних каньйонів»), поблизу високих фасадів будівель або під густою рослинністю виникає ефект екранування та багатошляховості радіосигналу, що унеможливлює отримання фіксованого рішення [26]. Окрім природних та інфраструктурних обмежень, в умовах воєнного стану суттєвим дестабілізуючим фактором стає активне застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). На територіях, наближених до зон активних бойових дій, використання систем РЕБ призводить до навмисного спотворення або підміни сигналів глобальних навігаційних супутникових систем. Це спричиняє критичне зниження точності визначення координат або повну втрату навігаційного рішення, що значно

обмежує можливості застосування GNSS-технологій для виконання топографо-геодезичних робіт [14].

Технологія мобільного лазерного сканування на основі алгоритмів SLAM є інноваційним рішенням, яке базується на одночасному аналізі хмари точок лазерних відбитків для визначення власного положення сканера у просторі та побудови тривимірної карти навколишнього середовища без використання супутникових сигналів у момент зйомки [8, 9, 17, 26]. Цей підхід забезпечує високу швидкість реєстрації об'єктів у русі, формує надщільну просторову модель та створює основу для побудови цифрових моделей і тривимірних двійників об'єктів [18, 22, 24]. Слабкою стороною технології є накопичення геометричної похибки траєкторії, що потребує дотримання методики замкнених маршрутів, використання алгоритмів оптимізації, контролю якості хмари точок та геодезичної прив'язки до опорних точок [8, 15, 17, 26].

Для систематизації критеріїв вибору технології нижче наведено порівняльну характеристику досліджуваних методів за ключовими експлуатаційними показниками.

Таблиця 1.1

Комплексний аналіз техніко-технологічних параметрів методів зйомки

Критерій порівняння	**Електронна тахеометрія**	**Супутникові виміри (GNSS-RTK)**	**Технологія LiDAR SLAM**
Принцип збору просторових даних	Дискретний (поточковий, ручне візування)	Дискретний (поточкове координування)	Безперервний кінематичний (автоматична хмара точок) [8, 9, 21, 26].
Швидкість польового етапу	Низька (потребує багато часу на перестановку приладу)	Середня/Висока (обмежена швидкістю пересування оператора)	Надзвичайно висока (зйомка виконується безперервно у темпі ходьби) [1, 8, 19].

Продовження таблиці 1.1

Рівень щільності інформації	Низький (десятки/сотні точок на об'єкт)	Низький (фіксуються лише характерні злами контурів).	Максимальний (мільйони точок, що формують суцільну 3D-модель) [1, 18, 22].
Вплив зовнішнього середовища	Залежить від прямої видимості та погодних умов	Критично залежить від відкритого небозводу й забудови	Менше залежить від умов освітлення та може працювати в умовах обмеженого GNSS-сигналу й щільної забудови [8, 19, 26].
Локальна точність вимірів	Найвища (міліметровий рівень, до 1–2 см)	Висока (сантиметровий рівень, 1–3 см в ідеальних умовах)	Середня/висока після камерального зрівнювання та контролю якості [1, 19, 26]
Частка камеральної обробки	Мінімальна (імпорт точок та безпосереднє креслення)	Мінімальна (експорт готових координат у CAD-середовище)	Значна (фільтрація хмари точок, зрівнювання, векторизація) [8, 19, 23].

Аналіз геопросторових умов території земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 у місті Києві засвідчив, що об'єкт характеризується високою щільністю забудови, наявністю складних архітектурних форм наземних споруд та густими елементами благоустрою та озеленення. Використання класичних тахеометрів у таких умовах призвело б до надмірного збільшення кількості станцій (точок стояння), значного ускладнення польових робіт через постійне перекриття ліній візування гілками дерев чи парканами, що суттєво підвищило б ризик виникнення людських помилок при

ручному виборі пікетів. У свою чергу, застосування виключно GNSS-приймачів є неможливим через сильне радіозатінення та багатошляховість сигналів біля стін капітальних будівель, що не дозволяє досягти нормативної точності для плану масштабу 1:500 [12, 14, 26].

З огляду на це, у межах бакалаврської роботи було обрано метод мобільного лазерного сканування на основі технології SLAM як основний підхід до виконання топографічної зйомки. Застосування ручного лазерного сканера дозволяє забезпечити низку переваг у порівнянні з традиційними методами геодезичних вимірювань.

До основних переваг належить висока повнота отриманих просторових даних при мінімальних трудових витратах. На відміну від точкових вимірювань, характерних для тахеометричної або GNSS-зйомки, мобільне сканування забезпечує безперервну фіксацію геометрії об’єктів, включаючи фасади будівель, елементи благоустрою, підпірні стінки та інші деталі ситуації під час руху оператора по території [8].

Важливою перевагою є також незалежність від умов супутникового позиціонування. Алгоритми SLAM здійснюють відносну локалізацію на основі аналізу геометричних особливостей навколишнього середовища, що дозволяє ефективно працювати в умовах щільної міської забудови або часткового перекриття GNSS-сигналу. У таких умовах елементи забудови та рослинності використовуються як орієнтири для побудови та узгодження траєкторії сканування [9, 16].

Окрім цього, отримана тривимірна хмара точок може використовуватися як цифрова модель об’єкта, що забезпечує можливість виконання детальних вимірювань у камеральних умовах. Це зменшує потребу у повторних виїздах на об’єкт та підвищує ефективність подальших інженерних і проєктних робіт [21, 22].

Таким чином, використання технології SLAM у поєднанні з геодезичною прив’язкою, камеральним зрівнюванням та контролем якості є раціональним

методичним підходом для створення топографічного плану масштабу 1:500 в умовах сучасного урбанізованого середовища міста Києва.

1.5. Методика виконання топографічної зйомки з використанням технології SLAM

Сучасний розвиток топографо-геодезичного виробництва характеризується концептуальним переходом від традиційних точкових методів фіксації контурів до високошвидкісних кінематичних технологій суцільного просторового моделювання, серед яких метод мобільного лазерного сканування на основі алгоритмів SLAM займає провідне місце завдяки високому рівню автономності, оперативності та деталізації отриманих даних [1, 8, 26].

Математична сутність технології SLAM полягає у здатності інтегрованого програмно-апаратного комплексу забезпечувати паралельне вирішення взаємопов'язаних завдань побудови тривимірної карти невідомого простору та точного визначення просторового положення самого сенсора, що досягається за рахунок комплексування даних LiDAR-датчика, інерціального модуля IMU та цифрових RGB-камер, дозволяючи виконувати польові роботи в умовах повної відсутності стабільного супутникового сигналу [8, 15, 17, 25, 26].

Аналіз нормативно-правової та методичної бази довів, що застосування мобільних лазерних сканерів для створення топографічних планів масштабу 1:500 є методично обґрунтованим за умови забезпечення надійної прив’язки отриманої геометричної моделі до Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 та дотримання вимог чинного Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 щодо точності топографічних знімань [4, 12, 13].

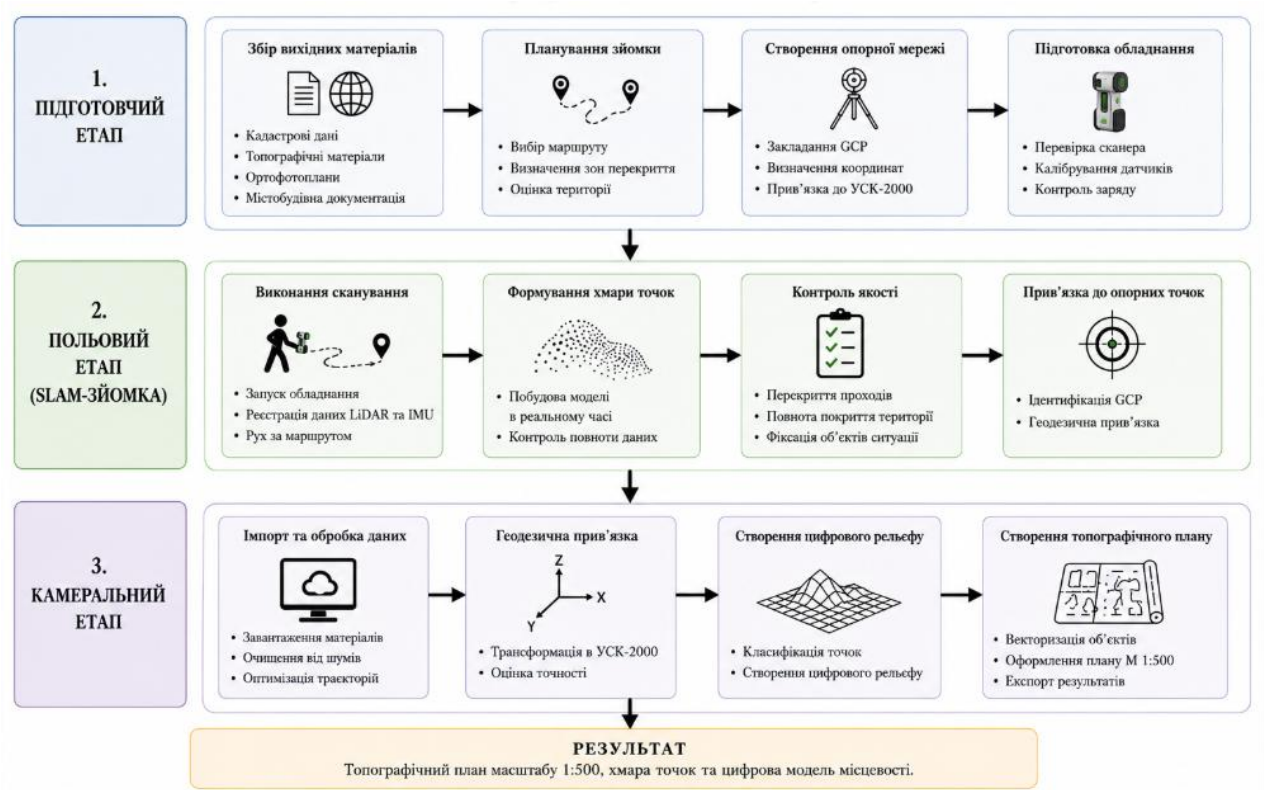
Системне зіставлення техніко-технологічних параметрів сучасних методів зйомки дозволяє зробити висновок, що в умовах щільної міської капітальної забудови та насиченого рослинного покриву технологія LiDAR SLAM демонструє вищу ефективність порівняно з класичною електронною тахеометрією та супутниковими GNSS-вимірюваннями, оскільки мінімізує

вплив людського фактора, повністю усуває проблему екранування радіосигналів біля фасадів та значно скорочує тривалість польового етапу робіт [1, 8, 18, 26].

Загальна методика виконання інженерно-геодезичних вишукувань із використанням SLAM-систем базується на послідовності підготовчих, польових та камеральних процесів (схема 1.1), де ключовими факторами забезпечення нормативної точності виступають проєктування замкнених петлеподібних маршрутів сканування, контроль накопичення просторового дрейфу та подальша камеральна георефернсація отриманих просторових даних [8, 15, 17, 26].

Схема 1.1

Методика виконання топографічної зйомки з використанням технології SLAM



Висновки до розділу 1

У першому розділі розглянуто теоретичні, нормативно-правові та методичні засади створення топографічних планів із використанням технології SLAM. Встановлено, що сучасний розвиток топографо-геодезичного виробництва характеризується переходом від дискретних методів фіксації окремих точок до

високошвидкісного отримання суцільних тривимірних масивів просторових даних.

Проаналізовано основні методи виконання топографічної зйомки, зокрема електронну тахеометрію, GNSS-RTK-вимірювання та мобільне лазерне сканування на основі SLAM. Визначено, що традиційні методи забезпечують високу точність координатних визначень, однак їх ефективність знижується в умовах щільної забудови, обмеженої видимості, значної кількості дрібних об’єктів ситуації та нестабільного супутникового сигналу.

Розкрито сутність технології SLAM як методу одночасної локалізації сенсора та побудови карти навколишнього середовища. Встановлено, що робота SLAM-систем базується на комплексуванні даних LiDAR-сенсора, інерціального вимірювального модуля, візуальних сенсорів і, за наявності стабільного сигналу, GNSS-приймача. Особливе значення для забезпечення геометричної узгодженості результатів має побудова замкнених маршрутів і використання алгоритму Loop Closure.

Проаналізовано нормативно-правову базу виконання топографічної зйомки масштабу 1:500. Встановлено, що створення топографічних планів повинно здійснюватися з дотриманням вимог чинного Порядку топографічної зйомки, державної системи координат УСК-2000, будівельних норм і стандартів моделювання геопросторових даних.

За результатами порівняльного аналізу встановлено, що технологія LiDAR SLAM є доцільною для виконання великомасштабного знімання забудованих і складних за просторовою структурою територій. Її ефективність проявляється у високій швидкості польового етапу, щільності отриманих даних та можливості подальшого камерального дешифрування об’єктів за хмарою точок.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ВИКОНАННЯ ТОПОГРАФІЧНОЇ ЗЙОМКИ

2.1. Фізико-географічна і містобудівна характеристика об’єкта дослідження

Об’єктом дослідження у межах виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи є земельна ділянка з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 площею 0,2188 га, розташована в місті Києві, у Голосіївському адміністративному районі за адресою: вул. Блакитного, 6, 10 (діл. 5). Географічні координати центру ділянки становлять 50.388267° пн. ш., 30.518137° сх. д. Територія перебуває у державній власності та належить до земель житлової та громадської забудови [3].



Рис. 2.1 Зображення досліджуваної ділянки на супутниковому знімку

Джерело:https://earth.google.com/web/@50.38840756,30.51776452,188.12455731a,580.24591548d,35y,4.8387842h,0t,0r/data=CgRCAggBMikKJwolCiExZWpQMlp5c2RfT1JDeUpXVjVTTDBnLTRmVlN4eDZ3eHQgAToDCgExQgIIAEoICLWhyqkFEAE?authuser=1

Цільове призначення земельної ділянки визначено як 02.04 – для будівництва і обслуговування будівель тимчасового проживання. Функціонально територія використовується для експлуатації та обслуговування гуртожитків і господарських будівель, що формує специфічний тип міського середовища з поєднанням житлової та обслуговуючої інфраструктури.

Аналіз просторового оточення об’єкта дослідження свідчить про його розташування в межах Голосіївського району м. Києва, який характеризується поєднанням щільної міської забудови та значних зелених і рекреаційних територій. На основі аналізу супутникових матеріалів (рисунок 2.2) встановлено наявність у безпосередній близькості елементів природно-ландшафтного та рекреаційного призначення, що формують складну просторово-екологічну структуру району [20].



Рис. 2.2 Схема розміщення досліджуваної земельної ділянки відносно Національного природного парку «Голосіївський»

Джерело: https://kadastrova-karta.com/dilyanka/8000000000:79:301:0008?openstreetmap=true&dzk__pzf=true&soil-ukraine=false&crop-ukraine=false&land_polygones=false&dzk__index_map_lines=false&land_sales_points=false&auction_points=false

Така містобудівно-екологічна ситуація суттєво впливає на умови виконання геодезичних вимірювань, зокрема на стабільність супутникового GNSS-позиціонування через можливе часткове екранування та багатошляховість радіосигналів щільною капітальною забудовою та густою деревною рослинністю [7, 14, 20, 26]. У зв'язку з цим дана територія є максимально доцільною для застосування сучасних технологій мобільного лазерного сканування на основі алгоритмів SLAM, які забезпечують автономне формування щільної просторової моделі місцевості незалежно від умов прийому супутникових сигналів.

У містобудівному відношенні територія характеризується наявністю будівель гуртожиткового типу, допоміжних господарських споруд, внутрішньоквартальних проїздів, пішохідних зв'язків та елементів благоустрою. Подібна структура території зумовлює наявність значної кількості дрібних об'єктів ситуації, що потребують детального відображення при створенні топографічного плану масштабу 1:500.

У фізико-географічному відношенні ділянка розташована в межах рівнинної території міста Києва, з незначними перепадами висот та переважанням штучно сформованого покриття. Простір частково озеленений та містить елементи деревно-чагарникової рослинності, що є типовим для житлових територій міської забудови.

2.2. Аналіз вихідних геодезичних і картографічних матеріалів попередніх років

Аналіз зображення земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 на ортофотоплані (2025 р.) дає підстави встановити, що досліджувана ділянка характеризується помірно щільною забудовою. На ній ми

можемо ідентифікувати три будівлі, дві допоміжні споруди і невеликий спортивний майданчик. На досліджуваній території між будівлями спостерігаємо озеленені ділянки, які формують елементи внутрішнього благоустрою території. Також наявні пішохідні доріжки, які забезпечують зв'язок між об'єктами забудови. Поруч з досліджуваною територією проходить вулично-дорожня мережа, яка забезпечує транспортну доступність для території дослідження.



Рис. 2.3 Сучасний супутниковий знімок ESRI земельної ділянки

Джерело:https://museum.kpi.ua/map/?d=kyiv&l1=&l2=192X.SUMIL-126K&z=15&lon=30.516329&lat=50.387084

Також на досліджувану територію нами було здійснено пошук матеріалів попередніх років. Зокрема на вебресурсі «Машина часу і простору. Київ на картах», створеному Державним політехнічним музеєм імені Бориса Патона, знайдено топографічний план масштабу 1:2000 станом на 1909 рік, фотоплан 1934 року, ортофотоплани складені за результатами німецької аерофоторозвідки 1941-1944 рр.

На основі даних німецької аерофоторозвідки 14.01.1944 року можна ідентифікувати дві будівлі та зелені насадження між ними.

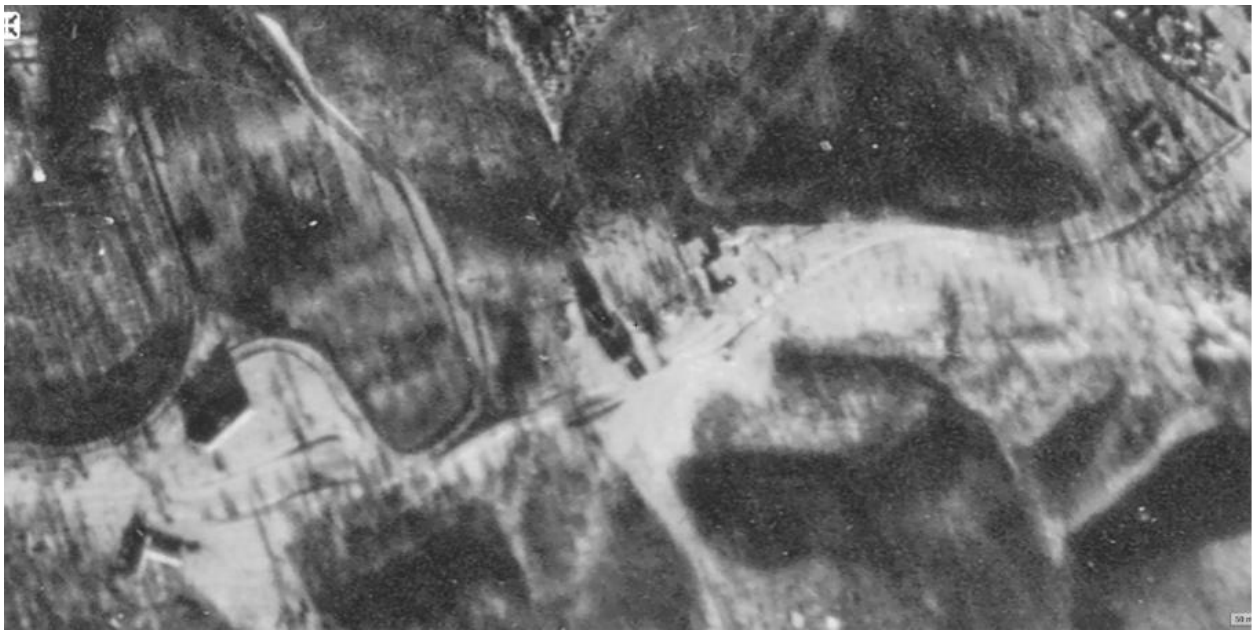


Рис. 2.4 Німецька аерофоторозвідка за 14.01.1944

Джерело:https://museum.kpi.ua/map/?d=kyiv&l1=&l2=1944-01-14.NARA.GX.DTTM5&z=16&lon=30.523067&lat=50.388719

За матеріалами 1941–1944 років можна ідентифікувати наявність двох будівель на досліджуваній території та зелені насадження між ними. Чітко видно дорогу, яка дає доступ до території.



Рис. 2.5 Німецька аерофоторозвідка за період 1941–1944 років

Джерело:https://museum.kpi.ua/map/?d=kyiv&l1=&l2=1941-1944.GX.MOSAIC&z=17&lon=30.518399&lat=50.388209

На території можна припустити наявність двох будівель. Біля під'їзного шляху зафіксовано окремий об'єкт, функціональне значення якого неможливо достовірно визначити за наявним зображенням.

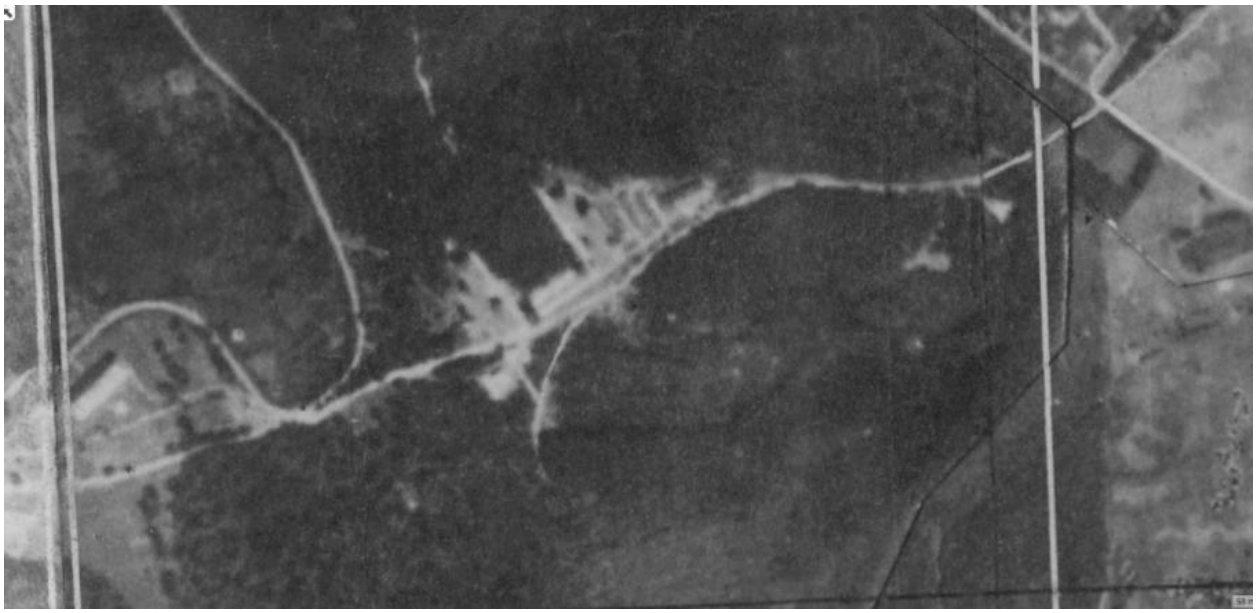


Рис. 2.6 Фотоплан за 1941 рік

Джерело:https://museum.kpi.ua/map/?d=kyiv&l1=&l2=1941-08.DE.BILDPLAN&z=17&lon=30.519537&lat=50.387833

За даними фотоплану 1934 року можна встановити наявність двох будівель, природного покриву між ними та проїзної дороги поруч.

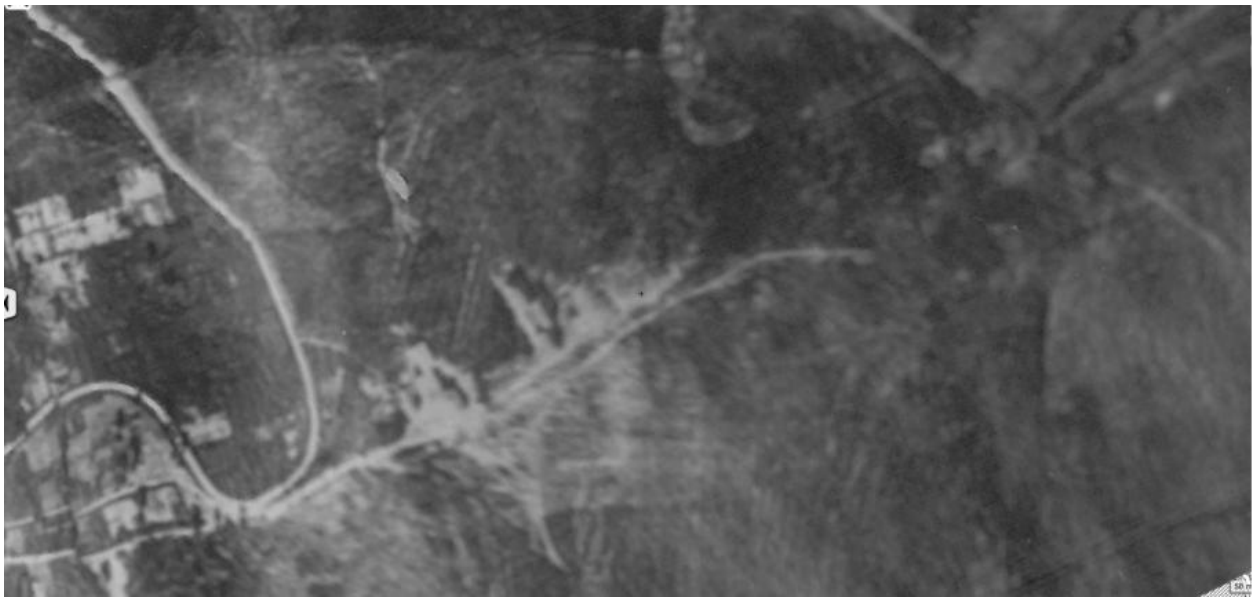


Рис. 2.7 Фотоплан за 1934 рік

Джерело:https://museum.kpi.ua/map/?d=kyiv&l1=&l2=1934.SU.AIR&z=16&lon=30.522058&lat=50.388500

На найстарішому доступному для території дослідження плані неможливо ідентифікувати об’єкти місцевості. Інформацію про будівлі та зелені насадження не видно, тому цей план є малоінформативним для аналізу інфраструктурних елементів.



Рис. 2.8 План міста Києва за 1909 рік

Джерело:https://museum.kpi.ua/map/?d=kyiv&l1=&l2=1909.NLIB.16326&z=17&lon=30.518163&lat=50.388407

З метою комплексного аналізу просторового розвитку досліджуваної території виконано порівняння матеріалів різних історичних періодів, що включає сучасні ортофотоплани, аерофотознімки воєнного періоду та фотоплани першої половини XX століття. Такий підхід дозволяє простежити динаміку змін містобудівної структури, характеру забудови та функціонального використання земельної ділянки у часовому розрізі.

На основі опрацьованих матеріалів встановлено поступову трансформацію території від слабо забудованого простору з переважанням природного покриву до сучасного сформованого міського середовища з розвиненою житлово-інфраструктурною структурою. Для систематизації отриманих результатів виконано узагальнення ключових просторових характеристик, які наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Аналіз розвитку території у часовому розрізі

Показник	**Сучасний знімок 2025 р.**	**Знімок 1944 р.**	**Знімок 1941-1944 р.**	**Фотоплан 1941 р.**	**Фотоплан 1934 р.**
Кількість об’єктів забудови	3 будівлі, 2 допоміжні споруди	2 будівлі	2 будівлі	2 будівлі	2 будівлі
Спортивна інфраструктура	наявна	відсутня	відсутня	відсутня	відсутня
Щільність забудови	помірна	низька	низька	низька	низька
Під'їзні шляхи	розвинені	наявні	наявні	наявні	наявні
Функція території	житлова	житлова	житлова	житлова	житлова
Ступінь освоєння	повністю сформований	початковий	початковий	початковий	початковий

Інформативність картографічних матеріалів оцінювалася за якістю просторового розрізнення та можливістю ідентифікувати об’єкти місцевості: сучасний ортофотоплан має високий рівень інформативності, аерофотознімки та фотоплани 1934, 1941–1944 рр. — низький рівень інформативності, а план 1909 року — дуже низький рівень інформативності.

2.3. Технічне та програмне забезпечення виконання робіт

Для проведення топографічної зйомки та створення тривимірної моделі досліджуваної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 було обрано геодезичне обладнання та спеціалізоване програмне забезпечення. Основним критерієм при виборі приладів стала можливість збору даних в умовах щільної забудови та густих зелених насаджень, які обмежують прийом супутникового сигналу.

Основним інструментом для збору просторових даних став ручний лазерний 3D LiDAR-сканер FJD Trion P2, який функціонує на основі технології SLAM [19]. Цей мобільний пристрій забезпечує можливість вільно переміщатися по ділянці під час зйомки, при цьому прилад автоматично визначає своє положення в просторі та будує тривимірну модель навколишнього середовища, що сприяє орієнтації та оптимізації польових робіт [8, 19, 26].



Рис. 2.9 Ручний лазерний 3D LiDAR сканер FJD Trion P2 з панорамною камерою Insta360 X5

Джерело:https://geoshop.com.ua/products/ruchnij-lazernij-3d-lidar-skaner-fjd-trion-p2-z-kameroyu-insta360-x5?srsltid=AfmBOorFzzit7WXprET6ohsy_X5JXeTONaBXhqLfS2v9WB93Wb6bA7xn

Сканер FJD Trion P2 – це компактний пристрій вагою менше одного кілограма, що є зручним для виконання польових робіт. Він об'єднує в одному корпусі лазерне сканування, обробку даних з декількох датчиків одночасно, алгоритми Multi-SLAM, розфарбовування хмари точок у реальному часі та географічну прив'язку за допомогою супутникових режимів RTK і PPK [19]. Така мобільність дає змогу виконувати зйомку ділянок зі складним рельєфом, великою кількістю дрібних об'єктів благоустрою (доріжки, паркани) та споруд

складної конфігурації, де використання звичайних електронних тахеометрів супроводжується додатковими часовими витратами.

Технічна будова сканера базується на спільній роботі декількох вимірювальних систем. Головним елементом є багатопроменевий лазерний датчик (LiDAR), який працює в інфрачервоному діапазоні та вимірює до 200 000 точок за секунду на відстані до 70 м залежно від відбивної здатності поверхні [19]. Його кут огляду становить 360° по горизонталі та 59° по вертикалі, що мінімізує виникнення «сліпих зон».

Для компенсації рухів оператора під час ходьби у сканер вбудовано інерціальний вимірювальний модуль (IMU), який безперервно фіксує нахили, кутові швидкості та прискорення приладу, забезпечуючи стабілізацію траєкторії та виправлення спотворень у хмарі точок [17, 19, 25]. Також система має вбудований GNSS-приймач для роботи з супутниками та цифрові RGB-камери [19]. Спеціальна технологія Multi-SLAM Fusion об’єднує потоки даних із LiDAR-сенсора, IMU, GNSS-приймача та камер, що дає змогу зменшити накопичення помилок, мінімізувати ефект дрейфу траєкторії та підвищити геометричну узгодженість кінцевої моделі при тривалій зйомці [8, 17, 19, 26].

Функціональною особливістю FJD Trion P2 є можливість створювати кольорову хмару точок під час зйомки. Сканер автоматично поєднує лазерні виміри з кадрами з вбудованих камер [19]. Завдяки цьому хмари точок отримують не тільки координати, але й реальний колір об’єктів, що спрощує подальшу камеральну обробку, дешифрування елементів ситуації, розпізнавання типів покриття та меж будівель [8, 15, 19, 22]. Процес зйомки відображається на екрані мобільного додатка, тому оператор має змогу оцінювати якість даних і на місці дозняти пропущені ділянки, уникаючи повторних виїздів на об'єкт.

Координатна прив'язка даних виконується двома способами. На відкритій місцевості GNSS-модуль приймає супутниковий сигнал у режимах RTK або PPK, що дозволяє виконувати координатну прив’язку хмари точок до державної системи координат УСК-2000 [4, 14, 19]. Коли оператор підходить близько до стін гуртожитків або переміщується під густими кронами дерев, де

супутниковий сигнал є нестабільним, прилад переходить на автономний режим SLAM та інерціальну систему IMU [14, 26]. У такому разі зйомка ведеться у локальній системі координат, яку згодом трансформують у державну за допомогою спеціальних наземних маркерів або точок (реперів) із відомими координатами [8, 14].

Для розширення графічних можливостей на сканер можна встановити зовнішню панорамну камеру Insta360 X5 [19]. Вона кріпиться на верхню частину корпусу і дає змогу паралельно зі скануванням робити панорамні фотографії з роздільною здатністю 5.7K [19]. Ці матеріали використовуються для створення віртуальних моделей будівель та детального аналізу об'єктів ситуації [19, 22, 24].

Програмне забезпечення для роботи зі сканером ділиться на мобільний додаток для збору геоданих у полі та програми для комп'ютера. Камеральна обробка отриманих хмар точок виконується у програмних комплексах FJD Trion Scan та FJD Trion Model, які забезпечують імпорт даних, вирівнювання траєкторії, фільтрацію шумів, експорт у стандартні формати та подальшу роботу з результатами сканування [19, 23].

Програма FJD Trion Scan застосовується для базових операцій: імпорту файлів, вирівнювання траєкторії руху сканера, очищення даних від випадкових шумів (наприклад, перехожих чи автомобілів) та експорту результату в стандартні інженерні формати LAS, E57 або PLY [8, 19, 23]. Програма FJD Trion Model використовується для аналізу та створення креслень: у ній точки розділяють по шарах (рельєф, рослинність, будівлі), будують цифровий план та виконують векторизацію об'єктів [19]. Завдяки хмарній інфраструктурі кілька спеціалістів можуть працювати над одним проєктом одночасно, що підвищує швидкість підготовки підсумкової документації [23].

Таким чином, використання мобільного сканера FJD Trion P2 разом із спеціалізованим програмним забезпеченням дозволяє сформувати детальну інформаційну основу для створення топографічного плану масштабу 1:500, забезпечуючи виконання встановлених технічних вимог до точності геодезичних

вишукувань та раціональне використання робочого часу на польовому етапі робіт [8, 19].

2.4. Підготовка та організація польових робіт

Ефективність застосування мобільних лазерних сканерів на основі алгоритмів SLAM безпосередньо залежить від якості виконання комплексу підготовчих та організаційних заходів [8, 26]. На відміну від традиційних методів геодезичних вишукувань, де основний обсяг аналітичної роботи припадає на етап камеральної обробки, специфіка кінематичного знімання вимагає детального проєктування польових процесів до моменту активації сенсорів приладу.

Процес підготовки та організації польових робіт на досліджуваній земельній ділянці з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 включав послідовне виконання аналізу об'єкта, планування маршруту та налаштування обладнання. Первинним етапом стало попереднє обстеження ділянки з метою виявлення її геометричних та інфраструктурних особливостей. У процесі візуального огляду аналізувався характер розміщення капітальних споруд будівель гуртожитків, щільність і структура зелених насаджень, розташування елементів благоустрою у вигляді пішохідних доріжок або парканів, а також наявність штучних перешкод, які могли б обмежити переміщення оператора. Вибір мобільного лазерного сканування як основної методики знімання був обумовлений складними просторовими умовами об'єкта. Щільна забудова створює зони радіозатінення, що унеможливлює отримання стабільного фіксованого рішення за допомогою стандартної GNSS-апаратури в режимі RTK. Польові роботи було організовано в період мінімального розвитку листяного покриву ранньою весною, що дало змогу забезпечити кращу проникність лазерних променів крізь крони дерев і підвищити щільність реєстрації точок на підстильній поверхні та фасадах [7, 20].

При формуванні траєкторії сканування за технологією SLAM збір просторових даних обмежувався фізичною видимістю об'єктів. Оскільки

лазерний сканер фіксує лише поверхні, що відбивають сигнал, підземні інженерні комунікаційні мережі не могли бути інтегровані у хмару точок автоматично. Враховуючи, що основною метою роботи є підготовка вихідних просторових матеріалів для реконструкції існуючого контуру будівель гуртожитків та елементів благоустрою наземної ситуації, додаткові георадарні чи трасопошукові роботи в польовий етап включені не були. Основними критеріями при зйомці виступали геометрична та оптична доступність надземних конструктивних елементів.

На основі результатів попереднього обстеження було розроблено оптимальний маршрут руху оператора з урахуванням необхідності достатнього перекриття траєкторій сканування. Головною методичною вимогою при проєктуванні траєкторії стало забезпечення замкненого циклу та формування петлеподібних контурів, що є необхідною умовою для зменшення накопиченого дрейфу SLAM-траєкторії [8, 17, 26]. Початок і завершення сесії сканування передбачалися в єдиній фіксованій точці, що є базовою умовою для подальшої активації алгоритму Loop Closure. Цей механізм дозволяє системі ідентифікувати раніше обстежені ділянки простору, виконувати зворотне коригування накопичених похибок позиціонування та радикально мінімізувати ефект геометричного дрейфу траєкторії при тривалих маршрутах.

Перед виїздом на об'єкт здійснювався технічний контроль працездатності мобільної системи лазерного сканування FJD Trion P2. Процедура включала перевірку рівня заряду основних та резервних акумуляторних батарей, контроль об'єму внутрішнього флеш-накопичувача приладу, оцінку цілісності оптичних вікон LiDAR-сенсора та об'єктивів інтегрованих камер [19]. Безпосередньо перед початком вимірювань виконувалася синхронізація сканера з мобільним пристроєм керування через бездротовий протокол зв'язку Bluetooth, що дало змогу оператору здійснювати онлайн-моніторинг процесу накопичення просторових даних за допомогою планшета та слідкувати за щільністю покриття для забезпечення повноти зйомки.

2.5. Технологічний процес виконання зйомки з використанням технології SLAM

Технологічний процес виконання польового етапу геодезичних вишукувань із застосуванням технології SLAM складався з послідовних етапів розгортання та ініціалізації обладнання, безпосереднього кінематичного сканування за визначеною траєкторією, поточного контролю накопичення просторових даних та фіксації завершення сесії зйомки [8, 19, 26]. Основною метою цього процесу було отримання щільної, однорідної та геометрично цілісної тривимірної хмари точок досліджуваної території для подальшого створення топографічного плану масштабу 1:500.

Першим етапом виконання робіт було попереднє обстеження території земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008. На цьому етапі аналізувалися особливості місцевості, характер забудови, розташування будівель, зелених насаджень, елементів благоустрою та інших об’єктів, які могли впливати на процес сканування або створювати перешкоди під час переміщення оператора. Особлива увага приділялась наявності геометрично виражених елементів середовища, які можуть використовуватись алгоритмами SLAM як орієнтири для визначення просторового положення сканера. За результатами попереднього огляду формувався маршрут обходу території з урахуванням необхідності достатнього перекриття траєкторій сканування. Наявність замкнених маршрутів дозволяє підвищити точність взаємного узгодження окремих фрагментів хмари точок та зменшити просторові деформації цифрової моделі.

Безпосередній запуск технологічного процесу розпочинався на вихідній точці спланованого маршруту на території земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008. Перед початком роботи здійснювався контроль рівня заряду акумуляторних батарей, перевірка працездатності сенсорів та стабільності підключення мобільного пристрою для моніторингу процесу сканування. Обов'язковим етапом було увімкнення портативної системи

мобільного лазерного сканування FJD Trion P2 та її статичне калібрування. Також виконувалось калібрування інерціальної системи та камер, що необхідно для забезпечення стабільної роботи алгоритмів позиціонування та мінімізації похибок орієнтування під час руху оператора. Для цього сканер встановлювався на стабільну земну поверхню у нерухомому стані на проміжок часу тривалістю від 10 до 15 секунд. Ця процедура є критично важливою для ініціалізації інерціального вимірювального модуля (IMU). У цей момент внутрішнє програмне забезпечення виконувало математичне усереднення масиву зі ста послідовних вимірювань прискорення у стані спокою. Такий підхід дозволив точно визначити систематичні похибки та зміщення нуля гіроскопа й акселерометра по кожній із просторових осей для їх подальшого автоматичного віднімання від сирих кінематичних даних [25]. Компенсація цих зміщень гарантує точне визначення просторової орієнтації приладу відносно гравітаційного поля Землі та стабільну роботу алгоритмів позиціонування під час руху. Бортова система підтверджувала завершення ініціалізації лише після аналізу значень лінійної та кутової швидкості, коли показники шумів ставали нижче встановлених допустимих меж, фіксуючи коректне початкове положення траєкторії.

Після завершення ініціалізації польові роботи виконувались методом безперервного мобільного сканування шляхом переміщення оператора заздалегідь визначеним петлеподібним маршрутом навколо будівель гуртожитків. У процесі руху система SLAM одночасно здійснювала реєстрацію просторових координат за допомогою багатопроменевого LiDAR-датчика та фіксувала інерційні виміри у реальному часі. Оператор утримував прилад за допомогою спеціальної рукоятки та дотримувався рівномірної швидкості переміщення у темпі спокійної ходьби без різких прискорень чи динамічних поворотів, що дозволило забезпечити високу стабільність сканування та формування більш щільної хмари точок.

Функціонування системи під час руху базувалося на технології Multi-SLAM Fusion, яка реалізує інтеграцію інформаційних потоків із LiDAR-сенсора,

інерціальної системи, вбудованого GNSS-приймача та цифрових камер [14, 17, 19, 26]. На відкритих ділянках місцевості система активно задіяла супутниковий модуль для встановлення абсолютної координатної орієнтації у режимах RTK і PPK з сантиметровою точністю. При наближенні до фасадів будівель або під щільними кронами дерев, де супутниковий сигнал зазнав екранування, провідну роль переймав безпосередньо SLAM-протокол. Положення сканера у просторі визначалося шляхом ітераційного зіставлення суміжних лазерних відображень, де геометрично виражені елементи стін, віконних прорізів та рельєфу виступали просторовими орієнтирами.

Контроль процесу сканування здійснювався в режимі реального часу за допомогою мобільного пристрою, синхронізованого зі сканером через бездротове підключення Bluetooth. Безперервне відображення побудови тривимірної хмари точок дозволяло оперативно контролювати щільність покриття та якість отриманих даних безпосередньо під час ходьби [8, 19, 23]. У випадках, коли окремі елементи місцевості або складні конструктивні елементи благоустрою були відскановані недостатньо якісно або виникали затінені пропуски, оператор виконував повторне проходження відповідних ділянок маршруту. Повернення до об'єктів для додаткового сканування забезпечувало високу щільність точок, де вони розташовувалися максимально близько одна до одної, гарантуючи детальну фіксацію контурів споруд.

Тривалість польового етапу становила близько 30–35 хвилин. Роботи проводились у весняний період, коли дерева ще не мали густого листяного покриву, що мінімізувало вплив рослинності на проходження лазерних променів та покращило фіксацію наземних об’єктів. Найкраща якість сканування спостерігалась у межах забудованих ділянок, поблизу фасадів будівель, які забезпечували алгоритмам SLAM надлишкову кількість чітких орієнтирів. Під час польового етапу здійснювався постійний контроль цілісності обладнання. Роботи проводилися під наглядом помічника геодезиста з компанії ТОВ «ГЕОФІКС», який контролював експлуатацію системи та дотримання загальних вимог безпеки. Контрольні геодезичні точки безпосередньо під час сканування

не закладалися, тому оцінювання якості результатів виконувалося за внутрішньою узгодженістю хмари точок, матеріалами польової фотофіксації та заявленими технічними характеристиками сканувальної системи FJD Trion P2 [19].

Важливим методичним завданням при завершенні проходження маршруту було забезпечення замкненого циклу сканування. Фіксація закінчення знімальних робіт виконувалась суворо в тій самій точці, де відбувався запуск приладу. Це дозволило системі повторно зіставити геометрію початкової ділянки місцевості та автоматично активувати механізм Loop Closure, який використовується для виявлення замкнутих контурів, коригування накопичених похибок і підвищення геометричної узгодженості хмари точок [8, 17, 26]. Цей алгоритм виконав математичне зрівняння всієї траєкторії руху оператора, здійснив зворотне коригування накопичених за час зйомки похибок та усунув просторові деформації цифрової моделі. У результаті виконання польових робіт було сформовано щільну тривимірну хмару точок досліджуваної території, а отримані масиви просторових даних були збережені та передані для подальшої камеральної обробки у програмних комплексах FJD Trion Scan та FJD Trion Model [19, 23].

2.6. Фотофіксація та схема виконання польових робіт

Комплекс польових геодезичних робіт із мобільним лазерним сканером FJD Trion P2 на території об'єкта дослідження супроводжувався обов'язковим виконанням фотофіксації ситуації та складанням детальної схеми знімального процесу [8, 19]. Головною метою цих заходів було створення інформаційного базису для подальшої камеральної обробки тривимірних даних та мінімізація помилок під час розпізнавання об’єктів місцевості. Фотофіксація дозволила задокументувати поточний стан елементів благоустрою, інфраструктури та фасадів будівель гуртожитків на момент проведення зйомки, що є критично важливим для забезпечення точності топографічного плану масштабу 1:500. Водночас розроблена схема виконання польових робіт графічно інтегрує

траєкторію руху оператора із межами кадастрового кварталу, відображаючи просторову логіку побудови цифрової моделі місцевості.



Рис. 2.10 Загальний вигляд території

Графічним відображенням просторової організації польового етапу вишукувань стала розроблена схема маршруту зйомки території. Цей графічний матеріал наочно ілюструє повну геометрію кінематичної траєкторії, фіксуючи точне просторове положення вихідної точки, напрямок руху оператора навколо капітальних споруд будівель гуртожитків НУБіП України, а також зони перекриття сканів. Схема демонструє практичну реалізацію принципу замикання контурів, що дозволяє верифікувати коректність накладання петель для автоматичного спрацьовування алгоритму Loop Closure [8, 17, 26]. Нанесення фактичного треку сканування на планову основу досліджуваної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 забезпечило чітке розуміння повноти просторового охоплення об'єкта та підтвердило відсутність незйомних або екранованих зон у межах знімального майданчика.



Рис. 2.11 Схема маршруту зйомки території

З метою детального документування безпосереднього процесу виконання вишукувань та фіксації умов навколишнього середовища під час польового виїзду здійснювалась зйомка проходження всього визначеного маршруту. На основі цих матеріалів було проведено ретельний вибір та екстракцію характерних статичних кадрів, які сформували основу матеріалів фотофіксації дослідження.



Рис. 2.12 Статична ініціалізація приладу FJD Trion P2 перед початком зйомки



Рис. 2.13 Перенесення пристрою оператором під час кінематичного сканування



Рис. 2.14 Фіксація рослинного покриву та зелених насаджень



Рис. 2.15 Фіксація кута повороту будівлі гуртожитку як геометричного орієнтира для алгоритмів SLAM



Рис. 2.16 Ручний лазерний сканер FJD Trion P2 під час виконання зйомки



Рис. 2.17 Об’єкти забудови в межах виконання зйомки

Отримані фото безпосередньо ілюструють етапи переміщення оператора з приладом FJD Trion P2, особливості утримання сканера, а також реальну оптичну видимість та стан фасадів будівель, прилеглих до них пішохідних контурів і зелених насаджень на момент зйомки. Використання кадрів із польової фотофіксації забезпечило високу інформативність супровідної документації, дозволивши надійно зафіксувати складні конструктивні вузли благоустрою території та сформувати верифікаційний базис для подальшого камерального дешифрування і контролю геометричної точності під час векторизації тривимірної хмари точок.

Висновки до розділу 2

Практична реалізація інженерно-геодезичних вишукувань дозволила детально дослідити фізико-географічні та містобудівні параметри земельної ділянки площею 0,2188 га в Голосіївському районі м. Києва по вул. Блакитного, де наявність щільної капітальної забудови гуртожитків НУБіП України та

густого деревного покриву прилеглого заповідного фонду НПП «Голосіївський» ускладнює стабільний прийом супутникового сигналу для класичних супутникових вимірювань, що підтвердило доцільність та технічну необхідність впровадження мобільного лазерного сканування.

Аналіз змін просторового розвитку об'єкта дослідження за часовий період з 1934 по 2026 роки, виконаний на основі системного зіставлення архівних фотопланів, німецької аерофоторозвідки періоду Другої світової війни та сучасних супутникових знімків ESRI, дозволив детально простежити та систематизувати часову еволюцію ділянки, зафіксувавши її поступову трансформацію від початкового ступеня освоєння з двома будівлями серед природного ландшафту до сучасного повністю сформованого міського середовища із розвиненою житлово-інфраструктурною системою.

Обґрунтування та формування інженерно-технічного складу робіт довело високу ефективність застосування ручного лазерного 3D LiDAR-сканера FJD Trion P2, який завдяки комплексу багатопроменевого датчика зі швидкістю вимірювань до 200 000 точок/с, інерціального модуля IMU та алгоритмів Multi-SLAM Fusion забезпечує суцільний автономний збір просторових даних високої щільності й розфарбовування хмари точок у реальному часі, визначивши спеціалізоване програмне забезпечення FJD Trion Scan та FJD Trion Model як базову інфраструктуру для подальшого камерального урівнювання, фільтрації та векторизації об'єктів.

Технологічний процес виконання польового етапу базувався на безперервному кінематичному скануванні території за замкненим петлеподібним маршрутом, що забезпечує коректну роботу алгоритму Loop Closure. Ключовими методичними чинниками забезпечення точності виступили попередня статична ініціалізація приладу у вихідній точці, а також проведення вишукувань у ранньовесняний період для досягнення максимальної проникності лазерних променів крізь рослинність.

Створення інформаційного та верифікаційного супроводу польових робіт забезпечено шляхом інтеграції оглядового аерознімка з БПЛА, графічної схеми

фактичного треку руху оператора та послідовної серії кадрів наземної фотофіксації, що задокументували етапи роботи приладу, стан зелених насаджень та кутові орієнтири споруд. У комплексі це формує достатню інформаційну основу, що мінімізує ймовірність геометричних помилок при розпізнаванні об’єктів місцевості та гарантує відповідність кінцевих результатів вимогам точності під час векторизації топографічного плану масштабу 1:500.

РОЗДІЛ 3

ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗЙОМКИ ТА СТВОРЕННЯ ТОПОГРАФІЧНОГО ПЛАНУ МАСШТАБУ 1:500

3.1. Камеральне опрацювання результатів SLAM-зйомки

Після завершення польового етапу інженерно-геодезичних вишукувань отримані масиви просторових даних були передані для виконання первинної камеральної обробки. Процес опрацювання розпочався з імпорту «сирих» даних лазерного сканування та інерціальних вимірів із внутрішнього накопичувача ручного 3D LiDAR-сканера FJD Trion P2 до спеціалізованого програмного комплексу FJD Trion Model. У цьому середовищі було запущено алгоритм автоматичного формування хмари точок, який базується на паралельному обчисленні траєкторії руху приладу та геометричних параметрів навколишнього простору. Завдяки інтегрованим математичним алгоритмам Multi-SLAM Fusion програма виконала урівнювання просторового треку оператора з урахуванням умов замикання петель (Loop Closure), що дозволило компенсувати накопичений геометричний дрейф інерціальної системи вимірів [8, 17, 19, 26].

Безпосередньо під час математичної обробки масиву в інтерфейсі FJD Trion Model було задано параметри Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 [4]. Це дозволило виконати геопросторову орієнтацію хмари точок у прийнятій системі координат та забезпечити її подальше використання для створення топографічного плану. Завершальним кроком первинної обробки у фірмовому програмному забезпеченні став експорт урівняної та георефероваої хмари точок в універсальний відкритий обмінний формат LAS, який зберігає повну просторову структуру та атрибутивну інформацію про кожну відскановану точку [19, 23].

Для забезпечення подальшої коректної інтеграції отриманих просторових даних в інженерне САПР-середовище, сформований файл LAS було імпортовано до програмного комплексу Autodesk ReCap. У цьому середовищі виконано

процес індексації точок та конвертації масиву у спеціалізований формат RCP. Дана процедура є методично необхідною, оскільки структура RCP-файлу оптимізована для безпосередньої роботи в інженерних продуктах компанії Autodesk. Це дозволяє оптимізувати обсяг оперативної пам'яті комп'ютера, уникаючи надмірного апаратного навантаження, та забезпечує плавне й стабільне відображення мільйонних масивів точок під час подальшої роботи в AutoCAD.

3.2. Створення цифрової моделі місцевості та 3D-моделі об’єкта

У сучасній геодезичній практиці щільна хмара точок лазерного сканування розглядається як тривимірна цифрова модель місцевості та об’єктів архітектури, оскільки вона з високою точністю відтворює реальну геометрію простору [18, 22, 24]. Візуалізація конвертованого RCP-файлу в інженерному середовищі дозволила сформувати цілісне і деталізоване тривимірне відображення всієї території дослідження. Створена модель забезпечила наочне просторове відображення капітальних будівель гуртожитків НУБіП України, контурів внутрішньоквартальних пішохідних доріжок, елементів дорожньої мережі, огорож, підпірних стінок, а також просторової структури зелених насаджень і рельєфу підстильної поверхні.

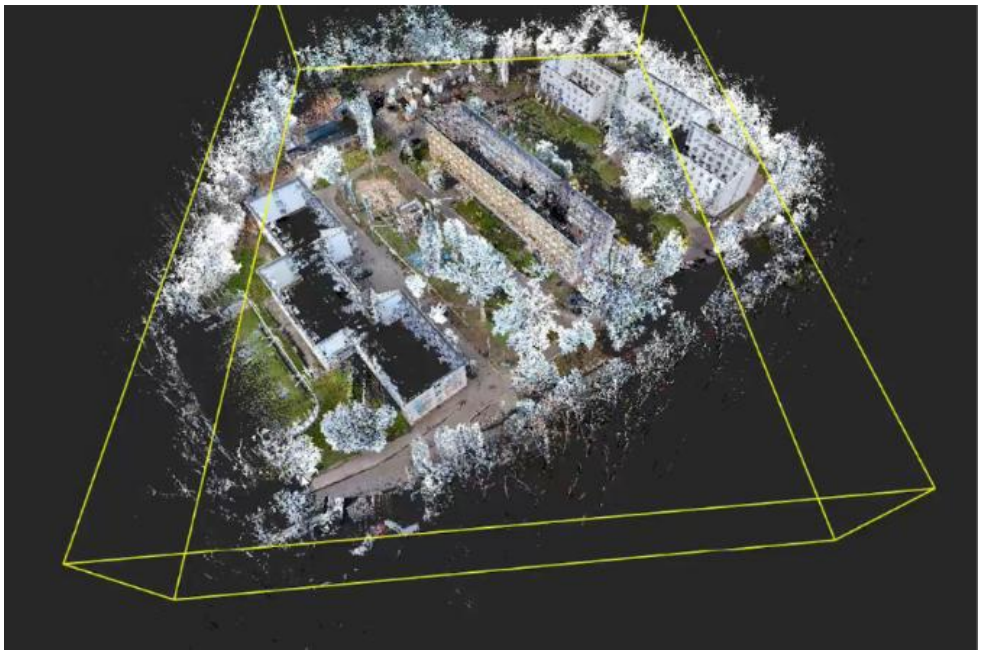


Рис. 3.1 Загальний вигляд тривимірної хмари точок об'єкта дослідження з реальним RGB-розфарбуванням та виділеною робочою областю

Важливим фактором підвищення інформативності та наочності отриманої моделі стало використання реального RGB-розфарбування точок, яке полегшує дешифрування об’єктів, інтерпретацію типів поверхонь і подальшу побудову тривимірних моделей [15, 19, 22]. Воно сформувалося завдяки автоматичній синхронізації лазерного датчика із вбудованими цифровими камерами під час польового кінематичного сканування ділянки. Накладання фотореалістичних колірних характеристик на лазерні відбитки дозволило чітко диференціювати типи покриття місцевості, візуально відокремити асфальт від ґрунту чи газону, а також безпомилково розпізнати межі віконних і дверних прорізів, ліній цоколів споруд та дрібних елементів інфраструктури благоустрою.

Сформована у такий спосіб цифрова тривимірна модель середовища виступила в ролі точного метричного шаблону та просторового каркаса для подальшого виконання картографічних робіт [1, 18, 22, 24]. Висока щільність точок сканування у поєднанні з реальним колірним відображенням об'єктів мінімізувала потребу в додаткових польових обстеженнях ділянки, створивши надійну геометричну основу для планового та висотного дешифрування всієї ситуації перед початком фінальної векторизації.

3.3. Створення топографічного плану масштабу 1:500

Заключним етапом камеральної обробки просторових даних стало безпосереднє створення цифрового топографічного плану масштабу 1:500 у середовищі САПР AutoCAD. Процес розпочався з інтеграції підготовленого в Autodesk ReCap файлу просторової моделі у форматі RCP у робочий простір креслення за допомогою стандартної функції підключення хмари точок. Оскільки координати масиву точок були заздалегідь урівняні та приведені до Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000, позиціонування тривимірного скану відбулося в автоматичному режимі з точним збереженням геодезичної посадки об'єкта [4]. Для переходу від тривимірного

простору хмари точок до двовимірного картографічного відображення було налаштовано ортографічну проекцію робочого поля у вигляді зверху та задано базовий масштаб моделі 1:1, що є стандартною умовою для подальшого проєктування масштабного плану.

Процес векторизації об'єктів ситуації та елементів благоустрою території виконувався шляхом напівавтоматичного та ручного трасування контурів за геометричними відбитками хмари точок [1, 8, 18]. Завдяки високій щільності лазерних відображень було виконано детальне обведення капітальних стін та виступів будівель гуртожитків, меж внутрішньоквартальних проїздів, асфальтованих і ґрунтових пішохідних доріжок, підпірних стінок та наявних огорож території. Окрему увагу під час векторизації приділено відображенню зелених насаджень. За геометрією стовбурів і контурів крон у хмарі точок було визначено просторове положення окремих дерев та межі чагарникової рослинності. На основі хмари точок також ідентифіковано та винесено на план малі архітектурні форми та інші об'єкти інженерної інфраструктури, що утворюють загальну ситуаційну картину досліджуваної ділянки.

Графічне оформлення і відображення рельєфу здійснювалося з дотриманням вимог чинних нормативних документів, зокрема Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 і правил моделювання геопросторових даних [5, 12]. Усі векторизовані об'єкти були розподілені за тематичними функціональними шарами AutoCAD, включаючи окремі шари для будівель, дорожньої мережі, рослинності, гідрографії та елементів рельєфу, що забезпечило структурованість цифрової моделі. Нанесення точкових, лінійних та контурних умовних знаків виконано відповідно до встановлених державних топографічних стандартів. Відображення рельєфу території реалізовано шляхом проведення горизонталей із нормативною висотою перерізу через 0,5 метра, що базувалося на аналізі висотних позначок точок підстильної поверхні, а також за допомогою розстановки характерних пікетних відміток висот на дорожньому покритті, видимих люках інженерних мереж та кутах споруд.

Фінальне формування топографічного плану включало компоновку аркуша у просторі листа, створення стандартної картографічної рамки, нанесення координатної сітки з кроком 50 метрів для масштабу 1:500, додавання лінійного масштабу та виконання необхідних пояснювальних підписів і технічних характеристик об'єктів. Проміжний результат формування векторизованої основи плану чітко відображає просторове розташування капітальних споруд, ліній рельєфу та елементів рослинності в межах робочої області (рис. 3.2).



Рис. 3.2 Векторизована основа топографічного плану масштабу 1:500 у робочому просторі AutoCAD

Завершальним кроком створення картографічного матеріалу став контроль якості та повноти дешифрування. Проведена перевірка взаємного положення векторизованих об’єктів відносно вихідної хмари точок та матеріалів польової фотофіксації підтверджує просторову узгодженість векторизованих об’єктів із вихідною хмарою точок та відсутність суттєвих візуально виявлених геометричних спотворень [1, 8, 12, 26]. Це гарантує інженерну точність

створеного документа та його придатність для подальшого використання у задачах містобудівного проєктування, ведення кадастру та реконструкції об'єктів університету.

3.4. Практичні рекомендації щодо використання технології SLAM у топографо-геодезичних роботах

Досвід практичного застосування мобільного лазерного сканування на основі технології SLAM для картографування території університету дозволив визначити ключові експлуатаційні особливості, переваги та обмеження цього методу порівняно з традиційними геодезичними підходами. Головною перевагою використання сканера FJD Trion P2 є надзвичайно висока швидкість збору геопросторових даних у русі, що забезпечує суттєве скорочення тривалості польового етапу робіт порівняно з тахеометричним зніманням. Технологія демонструє максимальну ефективність в умовах складної, щільної міської забудови, де класичні GNSS-виміри ускладнені через екранування супутникового сигналу стінами будівель або кронами дерев. Сформована в результаті сканування хмара точок має високу щільність і детальність, що значно спрощує процес створення великомасштабних топографічних планів масштабу 1:500, оскільки камеральний працівник бачить повну геометричну картину об'єкта без ризику пропуску дрібних елементів ситуації [1, 8, 18, 19, 26].

Разом з тим, мобільне лазерне сканування має низку специфічних технологічних обмежень, які необхідно враховувати для досягнення нормативної інженерної точності. Робота алгоритмів SLAM безпосередньо залежить від наявності чітких архітектурних форм та контурів у навколишньому просторі, які використовуються програмним забезпеченням як опорні геометричні орієнтири для взаємного зіставлення і послідовного зшивання кадрів. Через це виникають значні складнощі при зніманні відкритих однорідних просторів або ділянок із густою, суцільною рослинністю, де відсутність стабільних твердих поверхонь може призвести до збоїв у розрахунку траєкторії. Найбільш критичним фактором ризику є виникнення системного просторового

дрейфу, тобто поступового накопичення похибки інерціальної системи в процесі руху. За відсутності належної оптимізації це може призвести до роздвоєння контурів будівель, деформації лінійних елементів та спотворення геометрії фінальної цифрової моделі.

Для мінімізації зазначених негативних факторів та підвищення якості фінального картографічного матеріалу сформовано перелік практичних рекомендацій щодо організації польових та камеральних робіт. Під час планування польового етапу першочерговою умовою є побудова замкнених маршрутів руху оператора з регулярним поверненням у раніше відвідані точки, що забезпечує коректне спрацьовування алгоритму Loop Closure та зменшення накопиченого дрейфу траєкторії [8, 17, 26]. Під час сканування оператор повинен пересуватися плавно, уникаючи різких змін швидкості та різких поворотів приладу, що запобігає втраті орієнтації інерціальної системи. З урахуванням оптичних особливостей лазерного сканування, знімання територій із густою рослинністю доцільно виконувати у ранньовесняний або пізньоосінній період, коли відсутність листя забезпечує кращу видимість елементів ситуації та підвищує повноту фіксації наземних об’єктів [7, 20]. Додатково обов’язковим є постійний контроль формування хмари точок у режимі реального часу, що дозволяє оперативно виявляти пропуски та виконувати повторне сканування складних ділянок [8, 19, 23].

Висновки до розділу 3

У результаті виконання мобільного лазерного сканування досліджуваної території гуртожитків НУБіП України отримано високодеталізовані просторові дані, на основі яких сформовано тривимірну модель місцевості. Застосування технології SLAM та сучасних алгоритмів обробки хмар точок забезпечило побудову цілісної цифрової моделі території з мінімізацією накопичення похибок під час польових робіт.

Створена хмара точок характеризується достатньою щільністю та деталізацією для надійного виділення елементів ситуації, зокрема будівель,

дорожньої мережі, інженерних споруд і об’єктів благоустрою. Використання RGB-текстурування сприяло підвищенню ефективності дешифрування об’єктів та спростило процес подальшої векторизації матеріалів у програмному середовищі.

На основі оброблених результатів сканування виконано створення топографічного плану масштабу 1:500. Аналіз отриманих матеріалів підтвердив можливість застосування мобільного лазерного сканування для виконання великомасштабних топографо-геодезичних робіт за умови дотримання вимог щодо геодезичного забезпечення, обробки даних та контролю якості результатів.

Проведене дослідження засвідчило високу ефективність використання технології SLAM під час топографічного знімання забудованих територій, оскільки вона дозволяє суттєво скоротити тривалість польових робіт, забезпечити отримання повної просторової інформації та підвищити рівень автоматизації камеральної обробки. Отримані результати можуть бути використані для створення топографічної документації, оновлення картографічних матеріалів, а також для вирішення завдань містобудування, землевпорядкування та управління територіями.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано інженерно-геодезичні вишукування з метою створення топографічного плану масштабу 1:500 на частину земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 площею 0,2188 га, розташованої на території Національного університету біоресурсів і природокористування України в місті Києві.

Через щільну забудову території гуртожитків НУБіП України та наявність значної кількості зелених насаджень прилеглої території парку «Голосіївський» застосування традиційних GNSS-вимірювань було ускладнене внаслідок екранування супутникового сигналу. За таких умов найбільш доцільним рішенням стало використання технології мобільного лазерного сканування на основі алгоритмів SLAM, яка забезпечує отримання детальної просторової інформації та дозволяє виконувати знімання в умовах обмеженого супутникового покриття.

У ході дослідження проаналізовано сучасні підходи до виконання топографо-геодезичних робіт, розглянуто принципи функціонування технології SLAM, особливості використання мобільних LiDAR-сканерів та нормативно-правові вимоги до створення топографічних планів масштабу 1:500. Виконаний історико-картографічний аналіз дозволив простежити просторовий розвиток досліджуваної території та підтвердив необхідність актуалізації картографічних матеріалів.

Польовий етап робіт виконано із застосуванням ручного 3D LiDAR-сканера FJD Trion P2 за попередньо спланованим замкненим маршрутом сканування. У результаті знімання отримано високодеталізовану хмару точок, яка після камеральної обробки, георефернування в державній системі координат УСК-2000 та опрацювання із застосуванням алгоритмів SLAM і Loop Closure стала основою для побудови цифрової моделі місцевості.

На основі створеної тривимірної моделі виконано векторизацію елементів ситуації та рельєфу і сформовано топографічний план масштабу 1:500 з

відображенням будівель, дорожньої мережі, елементів благоустрою, зелених насаджень та рельєфу місцевості. Висока щільність хмари точок і використання RGB-текстурування забезпечили ефективне дешифрування об'єктів та суттєво скоротили потребу в додаткових польових вимірюваннях.

Проведений контроль якості шляхом порівняння результатів векторизації з вихідною хмарою точок та матеріалами польової фотофіксації підтвердив відповідність створеного топографічного плану вимогам, установленим для планів масштабу 1:500. Отримані результати свідчать про можливість ефективного використання технології мобільного лазерного сканування для виконання великомасштабних топографо-геодезичних робіт на забудованих територіях.

За результатами дослідження сформульовано практичні рекомендації щодо застосування технології SLAM, які передбачають використання замкнених маршрутів сканування, проведення робіт у періоди мінімальної вегетації рослинності та постійний контроль якості формування хмари точок під час польового етапу.

Практичним результатом роботи є створений топографічний план масштабу 1:500, який може бути використаний для потреб містобудівного проєктування, реконструкції об'єктів, ведення Державного земельного кадастру, оновлення картографічних матеріалів та вирішення інших інженерно-геодезичних завдань. Отримані результати підтверджують перспективність подальшого впровадження технології SLAM у практику топографо-геодезичних робіт як ефективного інструмента збору та опрацювання просторових даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білявський М., Данилів Н. Цифрове картографування територій за допомогою технології SLAM: аналіз точності отриманих результатів. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2025. Вип. 101. С. 5–16.

   DOI: https://doi.org/10.23939/istcgcap2025.101.005.

   URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2025/jun/39484/001ukrverstpravkavtablyci.pdf (дата звернення: 04.05.2026).

2. ДБН А.2.1-1:2014. Інженерні вишукування для будівництва. [Чинний від 2015-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 94 с. (дата звернення: 04.05.2026).

3. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру : офіційний вебсайт.

   URL: https://land.gov.ua (дата звернення: 12.05.2026).

4. Деякі питання функціонування Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 : постанова Кабінету Міністрів України від 22.09.2004 р. № 1259 : станом на 07.12.2023.

   URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1259-2004-%D0%BF (дата звернення: 07.05.2026).

5. ДСТУ 8774:2018. Географічна інформація. Правила моделювання геопросторових даних. [Чинний від 2019-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 218 с.

   URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78080 (дата звернення: 07.05.2026).

6. Євсюков Т., Дорош Л., Куценко О. Перспективи інтеграції технології SLAM у геоінформаційну систему державного земельного кадастру.

GEOFORUM'2025 : програма 28-ї Міжнародної науково-технічної конференції, Львів–Брюховичі, 9–11 квітня 2025 р. Львів, 2025.

URL: https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/03/PROGRAM_2025.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

7. Євсюков Т., Куценко О. Інноваційні підходи до обліку та оцінки лісових ресурсів на основі SLAM-технології (на прикладі ботанічного саду НУБіП України). Land Unity Summit 2025 : тези доповідей Міжнародної конференції, м. Івано-Франківськ, 11–12 вересня 2025 р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2025. С. 123–126.

   URL: https://dglib.nubip.edu.ua/items/3adddc9d-6ee7-42dc-967e-8a68a7d75f2e (дата звернення: 04.06.2026).

8. Кінь Д. О., Лазоренко Н. Ю., Карпінський Ю. О., Скорик М. А., Медведський Ю. В. Методика застосування SLAM-технології у топографічному картографуванні. Spatial Development. 2025. Вип. 15. С. 610–626.

   DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.610-626.

   URL: https://www.researchgate.net/publication/399075538 (дата звернення: 26.05.2026).

9. Основи SLAM-знімання: як працює побудова карти під час руху приладу. GeoShop : вебсайт. 2023.

   URL: https://geoshop.com.ua/statti/oglyadi/tehnologii/osnovi-slam-znimannya (дата звернення: 10.05.2026).

10. Положення про бакалаврську кваліфікаційну роботу у Національному університеті біоресурсів і природокористування України. Київ : НУБіП України, 2021.

URL:https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u382/polozhennya_bakalavrsku_kvalifikaciynu_robotu_2021_1.pdf (дата звернення: 04.06.2026).

11. Положення про політику використання штучного інтелекту у Національному університеті біоресурсів і природокористування України : наказ НУБіП України від 19.08.2024.

URL: https://nubip.edu.ua/polozhennya-pro-polityku-vykorystannya-shtuchnoho-intelektu-u-natsionalnomu-universyteti (дата звернення: 04.06.2026).

12. 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 р. № 1675, зареєстрований у Міністерстві юстиції України 05.06.2025 р. за № 868/44274.

URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0868-25 (дата звернення: 04.06.2026).

13. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність : Закон України від 23.12.1998 р. № 353-XIV : станом на 10.10.2024.

URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14 (дата звернення: 14.05.2026).

14. AlphaGeo Falcon X — технологія SLAM + RTK: новий рівень точності лазерного знімання. GeoShop : вебсайт. 2024.

URL: https://geoshop.com.ua/statti/novini/alphageo/alphageo-falcon-x--tehnologiya-slam--rtk-novij-riven-tochnosti-lazernogo-znimannya (дата звернення: 21.05.2026).

15. Campos C., Elvira R., Gómez Rodríguez J. J., Montiel J. M. M., Tardós J. D. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial, and Multimap SLAM. IEEE Transactions on Robotics. 2021. Vol. 37, No. 6. P. 1874–1890.

DOI: https://doi.org/10.1109/TRO.2021.3075644.

URL: https://arxiv.org/abs/2007.11898 (дата звернення: 04.06.2026).

16. Cazes G. Évaluation et développement des méthodes de photogrammétrie et de SLAM visuel pour la topographie 3D en milieu souterrain : thèse. Université de Montpellier, 2026. URL: https://theses.fr/s308402 (дата звернення: 07.05.2026).

17. Chen M., Yang S., Yi X., Wu D. Real-time 3D mapping using a 2D laser scanner and IMU-aided visual SLAM. 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). Okinawa, Japan, 2017. P. 297–302.

DOI: https://doi.org/10.1109/RCAR.2017.8311877.

URL: https://www.researchgate.net/publication/317182892_Real-time_3D_mapping_using_a_2D_laser_scanner_and_IMU-aided_visual_SLAM (дата звернення: 16.05.2026).

18. Di Stefano F., Chiappini S., Gorreja A., Balestra M., Pierdicca R. Mobile 3D scan LiDAR: a literature review. Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2021. Vol. 12, Iss. 1. P. 2387–2429.

DOI: https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1964617.

URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2021.1964617 (дата звернення: 04.06.2026).

19. FJDynamics. FJD Trion P2 LiDAR Scanner : official product page.

URL: https://www.fjdtrion.com/product/fjd-trion-p2-lidar-scanner (дата звернення: 04.06.2026).

20. 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. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024». 2024. Vol. 2024. P. 1–5.

DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510052.

URL: https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.2024510052 (дата звернення: 12.05.2026).

21. Keitaanniemi A., Virtanen J.-P., Rönnholm P., Kukko A., Hyyppä H., Hyyppä J. The Combined Use of SLAM Laser Scanning and TLS for the 3D Indoor Mapping. Buildings. 2021. Vol. 11, No. 9. Article 386.

DOI: https://doi.org/10.3390/buildings11090386.

URL: https://www.mdpi.com/2075-5309/11/9/386 (дата звернення: 04.06.2026).

22. Kovalchuk I., Ievsiukov T., Kutsenko O., Kozhemiako M., Kozhemiako P. Application of Laser Scanning for Modeling Cultural Heritage Objects. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025». 2025. Vol. 2025. P. 1–5.

DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552069.

URL: https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202552069 (дата звернення: 12.05.2026).

23. New hand-held 3D LiDAR scanners from FJDynamics series Trion S2 and GNSS-technology. GeoShop : вебсайт. 2024.

URL: https://geoshop.com.ua/statti/novini/fjdynamics/novi-ruchni-3d-lidar-skaneri-vid-fjdynamics-serii-trion-s2 (дата звернення: 21.05.2026).

24. Oliveira P. H. S. M. et al. Use of the SLAM technique associated with structured light mapping for registration and virtualization of historical heritage interiors. Research, Society and Development. 2021. Vol. 10, No. 10. Article e73101018624.

DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18624.

URL: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/18624 (дата звернення: 14.05.2026).

25. Titterton D., Weston J. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2nd ed. Stevenage : Institution of Engineering and Technology, 2004. 558 p.

DOI: https://doi.org/10.1049/PBRA017E. (дата звернення: 21.05.2026).

26. Zhang Y., Shi P., Li J. 3D LiDAR SLAM: A survey. The Photogrammetric Record. 2024. Vol. 39, Iss. 186. P. 457–517.

DOI: https://doi.org/10.1111/phor.12497.

URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/phor.12497 (дата звернення: 21.05.2026).

ДОДАТОК А

Топографічний план земельної ділянки з кадастровим номером 8000000000:79:301:0008 у масштабі 1:500

