

# Автоматизовані системи збору та обробки геодезичних вимірювань

Сучасна геодезія стрімко розвивається завдяки впровадженню цифрових технологій та автоматизованих систем. Ці системи дозволяють швидко збирати великі обсяги просторових даних та обробляти їх з високою точністю. Наша презентація розкриває принципи роботи, переваги та практичне застосування автоматизованих геодезичних систем у різних галузях — від будівництва до землеустрою та картографування.

Автоматизовані системи геодезичних вимірювань включають електронні тахеометри, GNSS-приймачі, лазерні сканери, цифрові нівеліри та безпілотні літальні апарати. Ці технології суттєво скоротили час, необхідний для збору даних, підвищили точність вимірювань та зменшили вплив людського фактора на результати.

Обробка даних здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє створювати тривимірні моделі місцевості, проводити аналіз рельєфу, розраховувати об'єми земляних робіт та проектувати інженерні споруди. Інтеграція з геоінформаційними системами (ГІС) розширює можливості аналізу та візуалізації просторових даних.

Впровадження автоматизованих систем змінило підхід до геодезичного забезпечення проєктів — від традиційних методів до комплексного моніторингу об'єктів у режимі реального часу. Це дозволяє підвищити безпеку будівництва, оптимізувати використання ресурсів та забезпечити відповідність проєктним рішенням.







# Вступ

## 1 Важливість автоматизації в геодезії

Автоматизація підвищує точність вимірювань до міліметрового рівня та збільшує ефективність на 40-60%. Зменшує похибки, пов'язані з людським фактором з 15% до 3%, та скорочує час виконання польових робіт у 3-5 разів порівняно з традиційними методами.

## 2 Огляд сучасних технологій

Електронні тахеометри Leica і Trimble забезпечують точність кутових вимірів до 0,5" та відстаней до 1 км. GNSS-приймачі RTK дозволяють визначати координати з точністю 8-10 мм. Лазерні сканери фіксують до 1 млн точок за секунду з радіусом дії до 2 км. БПЛА з фотограмметричними системами охоплюють площу до 350 га за один політ.



# Еволюція геодезичних вимірювань

1

Ручні методи (1900-1960)

Використання механічних теодолітів Вільда Т2, оптичних нівелірів Н-3 та сталевих мірних стрічок. Точність вимірювань становила 20-30 см на кілометр, а процес зйомки 1 га території займав приблизно 2-3 робочі дні.

2

Автоматизовані системи (1960-2000)

Впровадження електронних тахеометрів Leica TCR та Trimble, програмного забезпечення AutoCAD та Microstation. Точність підвищилась до 5-10 мм на кілометр, а швидкість зйомки зросла втричі. Обчислювальні операції скоротились з годин до хвилин.

3

Ключові етапи розвитку (2000-сьогодні)

Розробка GNSS-приймачів Trimble R8s з RTK-режимом, лазерних сканерів Leica BLK360 з точністю до 4 мм та БПЛА DJI Phantom 4 RTK. Один оператор може виконати за день роботу, що раніше потребувала бригади з 4-5 спеціалістів та тижня праці.



# Сучасні технології збору даних

## Основні методи

Електронні тахеометри Leica TS16 з точністю до 1", автоматичним наведенням на призму та функцією безрефлекторних вимірювань до 1000 м. GNSS-приймачі Trimble R12i з RTK-точністю 8 мм, технологією компенсації нахилу та працездатністю в складних умовах із 672 каналами прийому сигналу. Лазерні сканери Faro Focus S350 зі швидкістю 976,000 точок/с та радіусом дії до 350 м з кольоровим HDR-знімком. Цифрові нівеліри Sokkia SDL50 з похибкою  $\pm 0.6$  мм та функцією автоматичного розпізнавання штрих-кодових рейок. Кожен інструмент оптимізований під конкретні геодезичні завдання та інтегрується з єдиною системою обробки даних.

## Переваги автоматизації

Скорочення часу польових робіт на 65-70% завдяки автоматизованому збору даних без необхідності ручного запису. Підвищення точності вимірювань до  $\pm 2$  мм на км ходу за рахунок виключення суб'єктивних помилок оператора. Автоматична обробка та візуалізація даних у реальному часі з можливістю перевірки результатів безпосередньо на об'єкті. Зниження ймовірності помилок оператора з 15% до менше ніж 3% при складних вимірюваннях у міських умовах з високою щільністю забудови. Інтеграція з хмарними сервісами забезпечує миттєвий доступ до результатів усім учасникам проєкту та дозволяє вести цілодобовий моніторинг критичних об'єктів інфраструктури.

## Приклади впровадження

На будівництві Подільсько-Воскресенського мосту в Києві застосування автоматизованих систем моніторингу на базі роботизованих тахеометрів Leica TS60 дозволило контролювати деформації конструкцій з точністю до 0,5 мм. При реконструкції аеропорту "Бориспіль" мобільне лазерне сканування за допомогою Leica Pegasus забезпечило створення детальної 3D-моделі території площею 400 га за 3 дні, що в 15 разів швидше порівняно з традиційними методами. Система автоматизованого збору даних з GNSS-приймачів Trimble NetR9 використовується для моніторингу зсувних процесів у Карпатському регіоні та забезпечує передачу даних кожні 30 хвилин до центру аналізу.

# Електронні тахеометри

## Принцип роботи

Безвідбивне вимірювання кутів з точністю до 1" та відстаней до 5 км з точністю  $\pm(2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm})$ . Автоматичне зберігання до 50,000 точок у внутрішній пам'яті з координатами та атрибутами. Використовують фазовий або імпульсний метод вимірювання відстаней з частотою 1-2 ГГц. Сучасні моделі, як Leica TS60 та Trimble S9, оснащені системами автоматичного розпізнавання цілей (ATR) та компенсаторами для корекції похибок.

Провідні виробники, такі як Leica Geosystems, Trimble та Topcon, постійно вдосконалюють технології, пропонуючи моделі з підвищеною захищеністю від вологи та пилу (IP66/IP67), розширеним температурним діапазоном роботи (від -20°C до +50°C) та інтегрованими фотокамерами для документування об'єктів зйомки. Розвинуті програмні функції дозволяють проводити складні інженерні розрахунки безпосередньо в полі, виконувати обернену засічку, розбивку сіток та криволінійних трас.

## Можливості

Сервоприводи для автоматичного наведення на ціль, функція трекінгу рухомих об'єктів, інтеграція з CAD та ГІС системами. Широке застосування при винесенні проектів, топографічних зйомках, моніторингу деформацій інженерних споруд. Обладнані кольоровими сенсорними дисплеями з інтуїтивним інтерфейсом, можливістю створення тривимірних моделей місцевості в реальному часі та передачі даних через Bluetooth, Wi-Fi або мобільний інтернет. Сучасні тахеометри інтегруються з GNSS-приймачами для роботи в єдиній системі координат та з лазерними сканерами для отримання деталізованих хмар точок. Середній час роботи від акумулятора – 8-10 годин у польових умовах.

# GNSS-приймачі

## Глобальні навігаційні системи

Визначення координат об'єктів з точністю до сантиметрів за допомогою сигналів від супутникових систем. Підтримка мультисистемного режиму (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) забезпечує надійність вимірювань навіть у складних умовах.

Сучасні GNSS-приймачі обробляють одночасно сигнали від 60+ супутників різних систем, що дозволяє досягти надійного позиціонування навіть при обмеженій видимості неба. RTK-режим (Real Time Kinematic) забезпечує отримання координат в реальному часі з сантиметровою точністю.

## Технічні характеристики

Високопродуктивні GNSS-приймачі оснащені багатоканальними платами (440+ каналів), підтримують всі доступні частоти (L1, L2, L5), мають захист від багатопроменевості сигналу та працюють від акумуляторів до 16 годин. Передача даних здійснюється через Bluetooth, Wi-Fi або мобільний інтернет для забезпечення підключення до мереж постійно діючих референцних станцій (ПДРС).

Інтеграція GNSS-приймачів з іншими геодезичними приладами (електронними тахеометрами, інерціальними системами) забезпечує комплексний підхід до вирішення складних геодезичних задач. Комбіновані системи дозволяють проводити високоточні вимірювання в умовах обмеженої видимості супутників (міська забудова, лісові масиви) та створювати тривимірні моделі місцевості з високою детальністю.

## Точність та сфери використання

Висока точність у статичних вимірюваннях (до 3-5 мм у плані та до 10 мм по висоті). Широке застосування в інженерній геодезії, картографії, моніторингу деформацій споруд, землеустрої, будівництві та сільському господарстві для точного позиціонування техніки.

У кінематичному режимі GNSS-приймачі забезпечують точність до 8-10 мм + 1 ppm в плані та 15-20 мм + 1 ppm по висоті, що дозволяє ефективно використовувати їх для топографічних знімів великих територій та моніторингу рухомих об'єктів.

## Методи вимірювань

Основні методи GNSS-вимірювань включають статику (тривалі спостереження для досягнення найвищої точності), швидку статику (скорочений час спостережень), кінематику "стій-іди" (Stop&Go) та безперервну кінематику. Постобробка даних у спеціалізованому ПЗ дозволяє досягти міліметрового рівня точності для геодезичних мереж та моніторингу деформацій інженерних споруд.

# Лазерні сканери

## Принцип сканування

Вимірювання відстаней за допомогою імпульсного або фазового лазерного променя з точністю до 1-5 мм.

Створення щільної тривимірної хмари точок (до 1 млн точок/сек) для високодетальної моделі об'єкта.

Дальність дії – від 0.5 м до 2000 м.

Сучасні лазерні сканери використовують технологію "time-of-flight" для імпульсних систем або фазові зміщення для більш точних вимірювань. Кут огляду може складати до 360° по горизонталі та 320° по вертикалі, забезпечуючи повний огляд місцевості за один сеанс сканування.

## Інтеграція з іншими технологіями

Сучасні лазерні сканери інтегруються з фотограмметричними системами для створення текстурованих тривимірних моделей, що поєднують геометричну точність сканування з фотореалістичним відображенням поверхонь. Комбінація даних лазерного сканування з тепловізійними камерами дозволяє виявляти приховані дефекти будівельних конструкцій.

Технології доповненої реальності (AR) використовують хмари точок для порівняння стану "як побудовано" з проектною документацією безпосередньо на будівельному майданчику. Штучний інтелект та машинне навчання застосовуються для автоматичної класифікації та розпізнавання об'єктів у хмарах точок, що значно прискорює процес обробки великих масивів даних.

## Наземні та повітряні

Наземні сканери Leica BLK360, Faro Focus S для детального знімання архітектурних споруд та інженерних об'єктів. Повітряні LiDAR-системи Riegl VUX на БПЛА DJI Matrice 300 для картографування лісів, кар'єрів та будівельних майданчиків з висоти до 120 м.

Мобільні сканери, такі як Leica Pegasus:Backpack та Trimble MX9, дозволяють виконувати сканування під час руху, поєднуючи лазерне сканування з GNSS/INS системами для геоприв'язки даних. Це значно підвищує продуктивність польових робіт при зніманні лінійних об'єктів (доріг, ЛЕП, трубопроводів).

## Обробка та застосування

Спеціалізоване програмне забезпечення для обробки хмар точок, таке як Leica Cyclone, Trimble RealWorks та CloudCompare, дозволяє фільтрувати шуми, класифікувати точки та створювати тривимірні моделі з високою деталізацією.

Основні галузі застосування включають: BIM-моделювання будівель, моніторинг деформацій мостів та дамб, розрахунок об'ємів видобутку в кар'єрах, документування історичних пам'яток, криміналістичну реконструкцію аварій та створення цифрових двійників промислових об'єктів для подальшого проектування.

# Цифрові нівеліри

## Особливості роботи

Автоматичне зчитування висот з нівелірної рейки за допомогою CCD-сенсора з точністю до 0,01 мм. Швидкість вимірювань — до 3 відліків на секунду. Оснащені електронною пам'яттю на 10000+ вимірювань та системою компенсації відхилень від горизонталі.

Сучасні моделі (Leica DNA, Trimble DiNi, Sokkia SDL) використовують цифрову обробку зображення штрих-кової рейки. Вбудовані мікропроцесори забезпечують автоматичний розрахунок перевищень і середніх значень при багаторазових вимірюваннях. Функція самокалібрування дозволяє підтримувати високу точність протягом тривалого періоду експлуатації.

Сфери застосування: прецизійне нівелювання при будівництві інженерних споруд, моніторинг деформацій будівель та гідротехнічних споруд, геодезичний контроль під час монтажу промислового обладнання, спостереження за осіданням ґрунтів на територіях з підвищеним ризиком зсувів. Найсучасніші моделі дозволяють виконувати вимірювання з точністю до 0,3 мм на кілометр подвійного ходу.

## Переваги

Зменшення помилок оператора на 30-40% порівняно з аналоговими приладами. Автоматичний запис даних у форматі CSV/XML для подальшої обробки в ГІС. Інтеграція з GPS/GNSS для прив'язки до координат. Працездатність у складних умовах (туман, сутінки) завдяки інфрачервоній технології вимірювань.

Значне прискорення польових робіт — до 50% економії часу при виконанні великих обсягів нівелювання. Програмне забезпечення дозволяє виконувати розбивочні роботи у реальному часі. Кольорові сенсорні дисплеї підвищують комфорт роботи у різних умовах освітлення. Автоматичне збереження метеорологічних параметрів (температура, тиск) для підвищення точності результатів.





## Сенсорні системи в геодезії



### Види сенсорів

Високоточні інклінометри ( $\pm 0.001^\circ$ ), барометричні датчики тиску (точність до 0.1 гПа), п'єзоелектричні акселерометри та термістори ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ). Мультиспектральні та LiDAR сенсори для фіксації топографічних змін. Оптиковолоконні датчики деформацій з точністю до 1 мкм, ультразвукові далекоміри для моніторингу обводнених порожнин, магнітометри для виявлення підземних комунікацій. Гіроскопічні сенсори забезпечують визначення азимутів з точністю до 10 кутових секунд у шахтах та тунелях.



### Інтеграція

Бездротові мережі IoT-сенсорів для моніторингу деформацій мостів (до 0.1 мм) та зсувів ґрунту. MEMS-датчики інтегровані з RTK-приймачами для компенсації похибок. Системи раннього сповіщення при зміщеннях гідротехнічних споруд. Сенсорні мережі з автономним живленням від сонячних батарей забезпечують безперервний моніторинг протягом 5+ років. Інтеграція з хмарними платформами дозволяє проводити аналіз часових рядів даних та прогнозувати деформації з використанням алгоритмів машинного навчання.



### Обробка даних

Програмні комплекси для фільтрації шумів та компенсації температурних впливів. Фузія даних з різних типів сенсорів для підвищення достовірності результатів. Застосування методів штучного інтелекту для ідентифікації аномалій у великих масивах даних. Багатофакторний аналіз параметрів середовища для прогнозування геодинамічних процесів.



### Практичне застосування

Автоматичний моніторинг осідань будівель та споруд з онлайн-візуалізацією результатів. Безперервний контроль стану критичної інфраструктури (дамби, мости, тунелі) з системою оповіщення. Моніторинг зсувних процесів у гірських районах та попередження природних катастроф. Контроль деформацій при будівництві хмарочосів, метрополітенів та великих промислових об'єктів з високою точністю та частотою вимірювань.

# Інерціальні навігаційні системи (ІНС)

## Принцип роботи

Визначення координат за допомогою тривісних акселерометрів, що вимірюють лінійні прискорення, та волоконно-оптичних гіроскопів, які фіксують кутові швидкості. ІНС працює автономно в тунелях, печерах та щільній міській забудові, де відсутній сигнал супутників.

Сучасні ІНС використовують MEMS-технології (мікроелектромеханічні системи), що дозволяють зменшити розміри та вагу пристроїв при збереженні високої точності. Частота вимірювань досягає 200 Гц, що забезпечує деталізоване відстеження руху геодезичного обладнання навіть при високій динаміці.

## Сфери застосування

ІНС активно використовуються у мобільних картографічних комплексах, забезпечуючи точну геоприв'язку даних лазерного сканування та цифрових знімків. У будівництві та моніторингу інженерних споруд ІНС застосовуються для контролю геометрії вертикальних шахт, тунелів та інших підземних об'єктів.

Точність тактичних ІНС досягає  $0,01^\circ$  для кутових вимірювань та  $0,005 \text{ м/с}^2$  для вимірювань прискорення, що дозволяє їх використання у високоточній маркшейдерії та підземній навігації. Інтеграція з одометрами та іншими датчиками в режимі мультисенсорної фузії підвищує надійність системи та розширює можливості її застосування у складних умовах.

## Комбінування з GNSS

Інтеграція систем через фільтр Калмана забезпечує точність позиціонування до 10 см. Широке застосування в геодезичних роботах при картографуванні у міських каньйонах, лісових масивах та під час моніторингу зсувів ґрунту.

Інноваційні комбіновані системи GNSS/INS підтримують режим RTK (Real-Time Kinematic) з плавним переходом на інерціальне позиціонування при втраті супутникового сигналу. Використання комплементарного фільтру дозволяє компенсувати дрейф гіроскопів та похибки GNSS-підсистеми.

# Фотограмметричні системи

## Цифрова фотограмметрія

Створення тривимірних моделей місцевості з точністю до 1-2 см за допомогою цифрових зображень. Використання алгоритмів Structure from Motion (SfM) для автоматизованої обробки даних. Інтеграція з ГІС-системами для картографування та моніторингу.

Сучасні системи підтримують багатоспектральні камери, що дозволяють аналізувати не лише видимий спектр, але й інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Це відкриває можливості для моніторингу стану рослинності, виявлення археологічних об'єктів під поверхнею землі та оцінки вологості ґрунтів.

Програмне забезпечення для цифрової фотограмметрії (Agisoft Metashape, Pix4D, RealityCapture) дозволяє автоматично створювати хмари точок з мільйонами вимірювань, що забезпечує надзвичайно детальне відтворення об'єктів місцевості. Точність прив'язки покращується завдяки використанню наземних контрольних точок (GCP) з RTK-визначеними координатами.

## Сучасні тенденції розвитку

Інтеграція фотограмметричних систем з лідарними датчиками створює комплексні набори даних, які поєднують переваги обох методів. Використання технологій доповненої реальності дозволяє візуалізувати фотограмметричні моделі безпосередньо на місцевості. Автоматизований контроль якості на основі статистичних алгоритмів забезпечує надійність отриманих моделей та виявляє проблемні ділянки, які потребують додаткової зйомки чи обробки.

## Стереофотограмметрія

Використання стереопар зображень із перекриттям 60-80% для визначення просторових координат об'єктів. Забезпечує вертикальну точність до 0,5 см при зйомці з висоти 100 м. Застосовується для створення ортофотопланів, цифрових моделей рельєфу та моніторингу змін ландшафту.

Технології епіполярної геометрії та автоматичного пошуку відповідних точок дозволяють значно пришвидшити процес стереобробки. Сучасні цифрові стереофотограмметричні станції підтримують напівавтоматичне розпізнавання об'єктів та автоматичну векторизацію для створення топографічних планів.

Часова стереофотограмметрія використовується для моніторингу динамічних процесів – ерозії берегів, льодовиків, зсувів. Порівняння моделей, створених у різні періоди, дозволяє виявляти зміни з міліметровою точністю. Системи зі штучним інтелектом автоматично класифікують точки хмари за типами об'єктів (будівлі, рослинність, ґрунт, вода), що суттєво пришвидшує картографічні роботи.





# Безпілотні літальні апарати (БПЛА)

## Типи БПЛА

Мультикоптери (4-8 роторів, маневреність, 30-40 хв польоту), літаки (велика площа покриття, до 2 год автономії), гібридні системи (вертикальний зліт та горизонтальний політ). Радіус дії від 1 до 20 км залежно від класу.

## Переваги використання

Висока швидкість збору даних (до 5 км<sup>2</sup>/день), доступ до небезпечних та важкодоступних локацій, роздільна здатність знімків до 1-2 см/піксель. Зниження вартості робіт на 40-60% порівняно з традиційними методами. Можливість оперативного створення ортофотопланів.



# Обладнання БПЛА для геодезії



## Камери та сенсори

Sony Alpha 7R (42 Мп) для картографування, Micasense RedEdge-MX для аналізу рослинності, Velodyne VLP-16 LiDAR для 3D-моделювання з точністю 3 см. Роздільна здатність 1 см/піксель при висоті 100 м.



## Системи стабілізації та навігації

RTK GNSS-приймачі Trimble R10 (точність до 1 см), інерціальні системи STIM300, 3-осьові підвіси DJI Ronin-S з компенсацією вібрацій. Інтеграція з PPK для пост-обробки даних у складних умовах.

# Планування польотів БПЛА

## Програмне забезпечення

Спеціалізовані програми Pix4D Capture, DJI GS Pro та UgCS для автоматичного планування маршрутів зйомки. Інтеграція з цифровими моделями місцевості для врахування складного рельєфу, будівель та інших перешкод. Можливість попереднього моделювання польоту у 3D-середовищі.

Pix4D Capture дозволяє планувати різні типи місій: сітчасті, лінійні, кругові та об'єктні, що забезпечує оптимальне охоплення для різних типів зйомки. DJI GS Pro підтримує багатофазові місії з різними налаштуваннями камер для кожної фази. UgCS пропонує унікальну функцію адаптивного планування під рельєф з фіксованою відстанню до земної поверхні.

Нові рішення як DroneDeploy та Litchi також забезпечують хмарне зберігання планів польотів, можливість спільної роботи та інтеграцію з метеорологічними сервісами для оцінки безпеки польотів.

## Регуляторні аспекти та безпека

Планування польотів включає обов'язкову перевірку обмежень повітряного простору через сервіси типу AirMap або DJI Fly Safe. Маршрут повинен враховувати заборонені для польотів зони (NFZ), зони обмеженого доступу та правила візуальної видимості БПЛА (VLOS до 500 м або BVLOS з відповідними дозволами).

Система автоматично перевіряє наявність резервних локацій для аварійної посадки через кожні 200-300 м польоту. Для професійних геодезичних робіт необхідне планування розміщення наземних контрольних точок (GCP) з частотою мінімум 5 точок на км<sup>2</sup> для калібрування фотограмметричних моделей.

## Оптимізація маршрутів

Встановлення оптимальних параметрів: висота польоту 80-150 метрів, перекриття знімків 60-80% повздовжнє та 40-60% поперечне, швидкість 5-12 м/с. Автоматичний розрахунок точок зйомки для мінімізації часу польоту та максимізації площі покриття при обмеженому заряді батареї (20-30 хвилин).

Для картографічної зйомки використовуються сітчасті маршрути з вищим рівнем перекриття (до 85%) для забезпечення точності ортофотопланів до 1-2 см. При інспекції лінійних об'єктів (лінії електропередач, трубопроводи) застосовують потрібний прохід з різних кутів зору для повного аналізу. Для складних структур, як мости чи вежі, застосовується спіральна схема обльоту з поступовою зміною висоти.

Алгоритми оптимізації можуть враховувати напрямок вітру, положення сонця для мінімізації тіней, а також зони безпеки навколо критичної інфраструктури (до 100 м від аеропортів, електростанцій тощо). Сучасні рішення використовують машинне навчання для передбачення оптимальних траєкторій, базуючись на тисячах успішних місій.



# Обробка даних з БПЛА

## Фотограмметрична обробка

Створення цифрових моделей на основі знімків з перекриттям 60-80%. Використання спеціалізованого ПЗ (Agisoft Metashape, Pix4D, DroneDeploy, PhotoScan) для автоматичної побудови хмар точок з щільністю до 500-1000 точок/м<sup>2</sup>. Корекція спотворень камери та геоприв'язка з точністю до 2-5 см використовуючи методи аеротріангуляції та наземні контрольні точки (GCP).

Процес обробки включає калібрування камери, вирівнювання знімків, побудову щільної хмари точок, фільтрацію шумів та вилучення помилкових точок. Для підвищення точності застосовується RTK/PPK технологія з прив'язкою до референцних станцій. Автоматизація процесів обробки дозволяє обробляти масиви даних до 10,000 знімків за один проект.

Сучасні алгоритми машинного навчання та комп'ютерного зору дозволяють автоматично класифікувати об'єкти на знімках (будівлі, рослинність, водні об'єкти, дороги) та створювати тематичні карти. Системи автоматизованого виявлення змін порівнюють знімки різних періодів та виділяють зони значущих відмінностей. Обробка даних БПЛА у хмарних сервісах забезпечує можливість паралельних обчислень, що скорочує час обробки великих проектів з 1-2 днів до 2-4 годин.

## Ортофотоплани та 3D-моделі

Ортофотоплани з роздільною здатністю до 1-3 см/піксель для точного картографування. Цифрові моделі рельєфу (DTM) та місцевості (DSM) для розрахунку об'ємів та аналізу змін. Застосування у проектуванні доріг, моніторингу будівництва та створенні кадастрових планів.

Текстуровані 3D-моделі забезпечують візуалізацію об'єктів з фотореалістичною якістю. Експорт даних у формати BIM (IFC, RVT) для інтеграції з системами проектування. Хмари точок конвертуються у формати LAS/LAZ для сумісності з інженерними програмами (AutoCAD Civil 3D, Bentley). Аналіз часових серій зйомок дозволяє виявляти динаміку змін на місцевості з міліметровою точністю, що особливо важливо для моніторингу зсувів, ерозії ґрунтів та будівельних робіт.

# Лідарні системи на БПЛА

## Принцип роботи

Вимірювання відстаней за допомогою імпульсного лазерного променя з частотою 100-500 кГц. Створення хмари точок з густиною до 50 точок/м<sup>2</sup> та вертикальною точністю 3-5 см. Синхронізація з GNSS/INS системами для геоприв'язки даних.

Лідарні системи працюють шляхом випромінювання короткочасних лазерних імпульсів, які відбиваються від поверхні об'єктів. Час проходження сигналу від випромінювача до приймача дозволяє розрахувати відстань до об'єкта. Сучасні лідари можуть реєструвати до 1,5 млн точок за секунду та мають різні режими сканування: лінійний, конічний та растровий.

## Галузі застосування

Лідарне сканування з БПЛА широко застосовується в лісовому господарстві для інвентаризації лісів, в гірничодобувній промисловості для оцінки об'ємів видобутку, при інспектуванні ліній електропередач, в археології для виявлення древніх структур під лісовим покривом, а також при моніторингу берегової ерозії, зсувів та повеней. Точність сучасних систем дозволяє виявляти зміни поверхні на рівні сантиметрів.

Останні розробки в галузі включають мініатюризацію лідарних систем (вага до 1,5 кг) для встановлення на легкі БПЛА, підвищення енергоефективності, інтеграцію з гіперспектральними камерами та використання технологій штучного інтелекту для автоматичної класифікації хмар точок.

## Переваги та обмеження

Незалежність від освітлення, проникнення крізь рослинність з фіксацією до 5 відбиттів сигналу. Можливість картографування під кронами дерев та ЛЕП. Обмеження: висока вартість обладнання (від \$20,000), вагові обмеження для малих БПЛА, зниження ефективності при тумані та опадах.

Додаткові переваги включають високу швидкість збору даних (до 10 км<sup>2</sup>/год при висоті польоту 300 м), можливість одночасного отримання RGB та NIR зображень при використанні комбінованих систем. Обробка лідарних даних потребує потужного апаратного забезпечення та спеціалізованого ПЗ (TerraScan, LAStools, CloudCompare), що додає до загальної вартості проекту.

# Мобільні картографічні комплекси

Автоматизовані системи для високоточного збору просторових даних у русі з одночасною геоприв'язкою різнотипних сенсорів.

## Склад комплексу

Високоточний GNSS-приймач (RTK точність до 1 см), інерціальна навігаційна система з гіроскопами, лазерний сканер з частотою до 1 млн точок/сек, панорамні та спектральні камери з роздільною здатністю 40+ Мп. Монтаж на автомобілі, квадроциклі або спеціальному рюкзаку для пішого картографування.

## Технічні характеристики

Швидкість збору даних до 80 км/год при збереженні сантиметрової точності геоприв'язки. Радіус дії лазерних сканерів від 20 до 300 м залежно від моделі. Можливість роботи в тунелях та закритих приміщеннях завдяки інерціальній системі. Пропускна здатність — до 200 км лінійних об'єктів за день картографування.

## Обробка та інтеграція даних

Постобробка даних включає калібрування, фільтрацію шумів та видалення аномальних точок, суміщення даних від різних сенсорів. Створення єдиної бази даних з можливістю вилучення тематичних шарів інформації (рельєф, будівлі, рослинність, комунікації). Експорт даних у стандартні формати ГІС та САПР для подальшого аналізу.

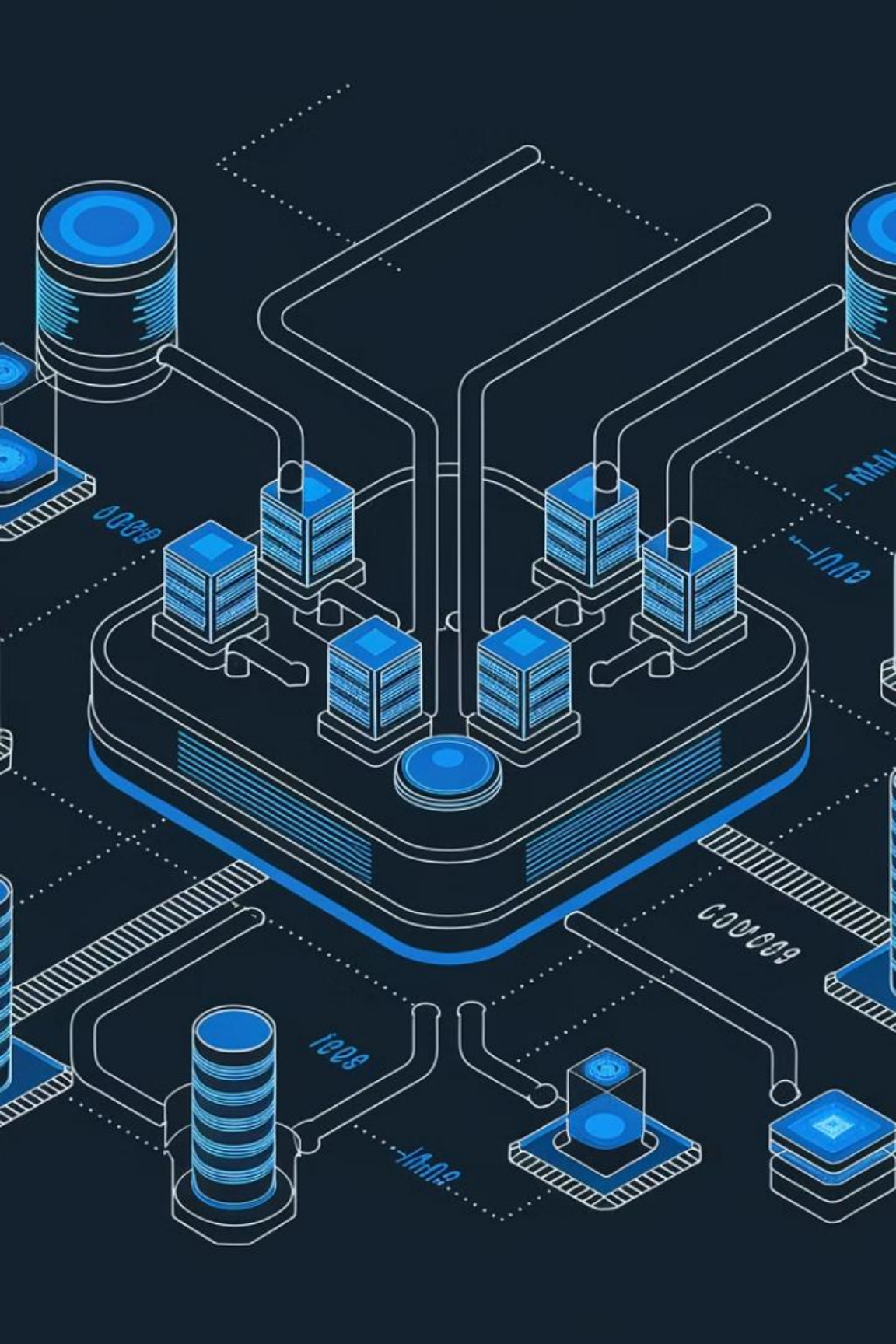
## Сфери застосування

Ефективний збір даних про дорожню інфраструктуру (розмітка, знаки, бар'єри), інженерні мережі та фасади будівель в міському середовищі. Створення детальних цифрових двійників міст із точністю до 5 мм, тривимірних моделей для планування будівництва та моніторингу змін. Використання для кадастрового обліку та аудиту об'єктів критичної інфраструктури.

## Переваги та особливості

Висока продуктивність збору даних порівняно з традиційними методами (у 10-15 разів швидше). Можливість повторного використання первинних даних для різних задач без повторного виїзду на місцевість. Автоматизована класифікація об'єктів із застосуванням алгоритмів машинного навчання. Інтеграція з муніципальними ГІС та системами управління активами для моніторингу стану об'єктів у режимі реального часу.





# Інтеграція даних з різних джерел

1

## Комбінування вимірювань

Синхронізація даних GNSS, ІНС та лазерних сканерів з БПЛА та наземних систем. Створення єдиної просторової бази з точністю до 2-5 см та повнотою покриття до 98%.

2

## Підвищення точності

Застосування алгоритмів фільтрації Калмана для мінімізації систематичних похибок до 1.5 см. Валідація моделей через контрольні точки для інженерних проектів класу А.

3

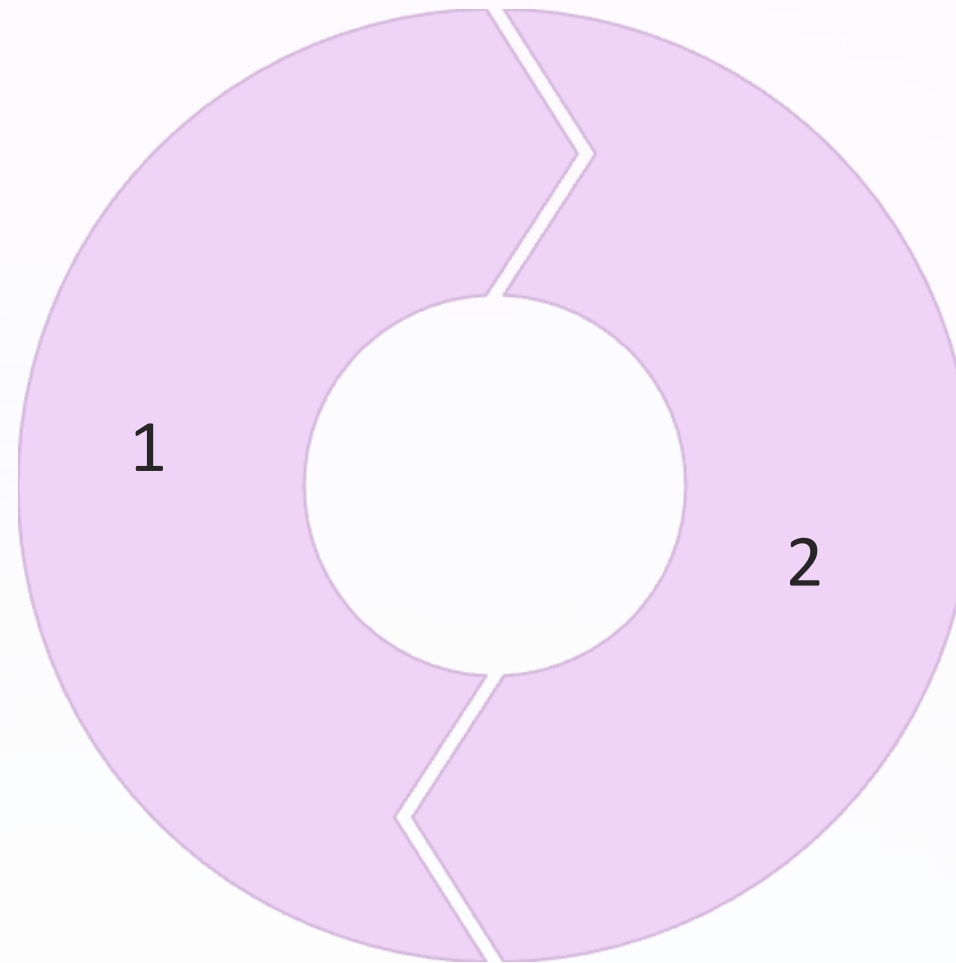
## Автоматизована обробка

Використання хмарних технологій для обчислення великих масивів даних. Скорочення часу обробки на 60% порівняно з традиційними методами.

# Автоматизовані системи моніторингу

## Постійний моніторинг

Комплексне вимірювання деформацій інженерних споруд та геологічних процесів з частотою до 100 Гц у реальному часі.  
Автоматизований аналіз даних за допомогою GNSS-датчиків, роботизованих тахеометрів та інклінометрів з точністю до 0,1 мм.



## Раннє виявлення

Своєчасне виявлення небезпечних явищ на основі порогових значень: зсуви ґрунту понад 5 мм/добу, деформації несучих конструкцій мостів та тунелів, осідання фундаментів висотних будівель.  
Автоматичне сповіщення відповідальних осіб через SMS та електронну пошту.





# Програмне забезпечення для обробки даних

## 1 Огляд продуктів

Agisoft Metashape для фотограмметричної обробки та 3D-моделювання, Pix4Dmapper для створення ортофотопланів, Trimble Business Center для обробки GNSS-вимірювань, AutoCAD Civil 3D для проектування об'єктів інфраструктури. Кожна програма має специфічні інструменти для різних геодезичних завдань.

## 2 Автоматизація процесів

Автоматизовані алгоритми для розпізнавання об'єктів на знімках, корегування систематичних похибок вимірювань, створення цифрових моделей рельєфу та формування технічних звітів згідно державних стандартів. Скорочення часу обробки до 60% порівняно з ручними методами.



# Хмарні технології в геодезії

## Зберігання та обробка даних

Зберігання до 1 ТБ даних лазерного сканування та фотограмметрії у хмарних сховищах Amazon S3 та Microsoft Azure. Доступ до проєктів через захищений VPN з будь-якої точки світу з затримкою менше 100 мс.

## Переваги хмарних рішень

Спільний доступ до проєктів для 5-20 співробітників одночасно. Скорочення витрат на ІТ-інфраструктуру на 30-40%. Автоматичне резервне копіювання кожні 15 хвилин та миттєве масштабування обчислювальних ресурсів під час обробки надскладних моделей.



# Штучний інтелект та машинне навчання

## Застосування ШІ

Автоматизація класифікації та розпізнавання об'єктів на супутникових і аерофотознімках з точністю до 98%. Виявлення змін на місцевості шляхом порівняння зображень різних періодів. Ідентифікація інженерних мереж та підземних комунікацій.

Сучасні алгоритми комп'ютерного зору дозволяють виділяти будівлі, дороги, водні об'єкти та рослинність з роздільною здатністю до 5 см. Нейронні мережі типу U-Net та DeepLabV3+ забезпечують семантичну сегментацію ортофотопланів для автоматичного оновлення кадастрових карт.

Геодезичні системи з ШІ аналізують до 10000 знімків за годину, що перевищує можливості ручної обробки у 50-100 разів. Це критично важливо при моніторингу надзвичайних ситуацій та оперативному картографуванні зон лих.

Впровадження систем штучного інтелекту в геодезію вимагає потужних обчислювальних ресурсів – від спеціалізованих робочих станцій з GPU NVIDIA RTX серії до хмарних сервісів з підтримкою тензорних процесорів. Окремі проєкти потребують обробки понад 10 ТБ геопросторових даних, що неможливо без застосування розподілених обчислень та оптимізованих алгоритмів машинного навчання.

## Машинне навчання

Покращення точності обробки даних лазерного сканування до 0,5 см. Виявлення закономірностей у масивах топографічних даних. Прогнозування деформацій споруд, зсувів ґрунту та інших геологічних явищ за допомогою нейромережевих моделей.

Алгоритми машинного навчання на основі методів Random Forest та SVM використовуються для класифікації точок хмар при лазерному скануванні, досягаючи точності розділення наземних об'єктів та рельєфу до 99,3%. Це дозволяє створювати високоточні цифрові моделі місцевості без ручного втручання.

Рекурентні нейронні мережі (LSTM) аналізують часові ряди GNSS-спостережень для прогнозування тектонічних рухів земної кори з точністю до 2 мм/рік. Аналіз деформацій інженерних споруд за допомогою методів глибокого навчання дозволяє завчасно виявляти потенційні проблеми та планувати превентивні заходи.

# Технологія BIM у геодезії

## Інтеграція BIM

Імпорт геодезичних вимірювань з GNSS та електронних тахеометрів безпосередньо в BIM-модель. Створення високоточних цифрових моделей рельєфу (DTM) з точністю до 2-3 мм для критичних об'єктів інфраструктури. Автоматичне оновлення моделей при надходженні нових геодезичних даних.

Синхронізація польових вимірювань із BIM-моделями в режимі реального часу забезпечує швидке виявлення відхилень від проєкту. Використання BIM-моделей для геодезичного розмічування дозволяє досягти точності позиціонування до 1 мм на відстані до 100 м. Інтеграція даних лазерного сканування з точністю до 0,5 мм збагачує BIM-модель детальною інформацією про існуючі конструкції та споруди.

## Переваги для будівництва

Скорочення часу проєктування на 30-40% завдяки точній 3D-візуалізації рельєфу. Зменшення витрат на земляні роботи до 25% через оптимізацію об'ємів. Виявлення геопросторових колізій на етапі проєктування знижує кількість помилок під час будівництва на 20%. Покращення експлуатаційного контролю через доступ до точних геодезичних даних протягом всього життєвого циклу об'єкта.

Підвищення ефективності командної роботи на 45% завдяки централізованому доступу до геопросторових даних. Зниження кількості запитів на внесення змін у проєкт на 35% завдяки детальній геодезичній інформації. Скорочення термінів будівництва на 15-20% через оптимізацію логістики та планування робіт на основі точних даних про рельєф. Зменшення ризиків геотехнічних проблем на 40% шляхом інтеграції геологічних даних у BIM-модель. Підвищення точності обчислення кошторисної вартості будівництва до 95% завдяки точному визначенню об'ємів робіт.





# Системи автоматичного управління технікою

1

## Принцип роботи

Використання RTK GNSS-приймачів та електронних тахеометрів для позиціонування техніки з точністю до 1-2 см. Тривимірні моделі місцевості інтегруються з бортовими комп'ютерами екскаваторів, бульдозерів та грейдерів для прецизійного управління робочими органами.

2

## Підвищення ефективності

Економія до 30% паливно-мастильних матеріалів та 25% будівельних матеріалів. Скорочення термінів земляних робіт на 40-50% порівняно з традиційними методами. Зменшення потреби в розмічувальних роботах та повторних вимірюваннях на 80%.

3

## Інтеграція з BIM

Двосторонній обмін даними між системами автоматичного управління та BIM-моделями забезпечує повний цикл контролю від проектування до введення об'єкта в експлуатацію. Можливість оперативного внесення змін та коригування проекту.

# Точне землеробство

## Геодезичні технології

Використання RTK GNSS-приймачів з точністю до 2 см для детального картографування ґрунтів та рельєфу полів. Створення високоточних цифрових моделей рельєфу для аналізу водостоків та ерозійних процесів. Формування карт продуктивності ділянок для диференційованого внесення добрив та засобів захисту рослин.

Інтеграція з дронами для моніторингу стану посівів та виявлення проблемних зон за допомогою мультиспектральних камер.

Використання супутникових даних для розрахунку вегетаційних індексів (NDVI) та прогнозування врожайності. Створення ґрунтових карт на основі електропровідності та спектрального аналізу.

## Автоматизація

Системи паралельного водіння з автопілотом для точного висіву насіння з мінімальними перекриттями та відхиленнями. Технології змінних норм внесення добрив (VRT) на основі даних ґрунтового аналізу та актуального стану рослин. Автоматичне секційне відключення обприскувачів для запобігання повторній обробці.

Автоматизовані зрошувальні системи з контролем вологості ґрунту та коригуванням норм поливу в залежності від потреб конкретних ділянок поля. Використання IoT-датчиків для моніторингу мікроклімату та стану ґрунту. Збір врожаю з картографуванням урожайності в реальному часі та автоматичним регулюванням роботи комбайнів.

## Економічні переваги

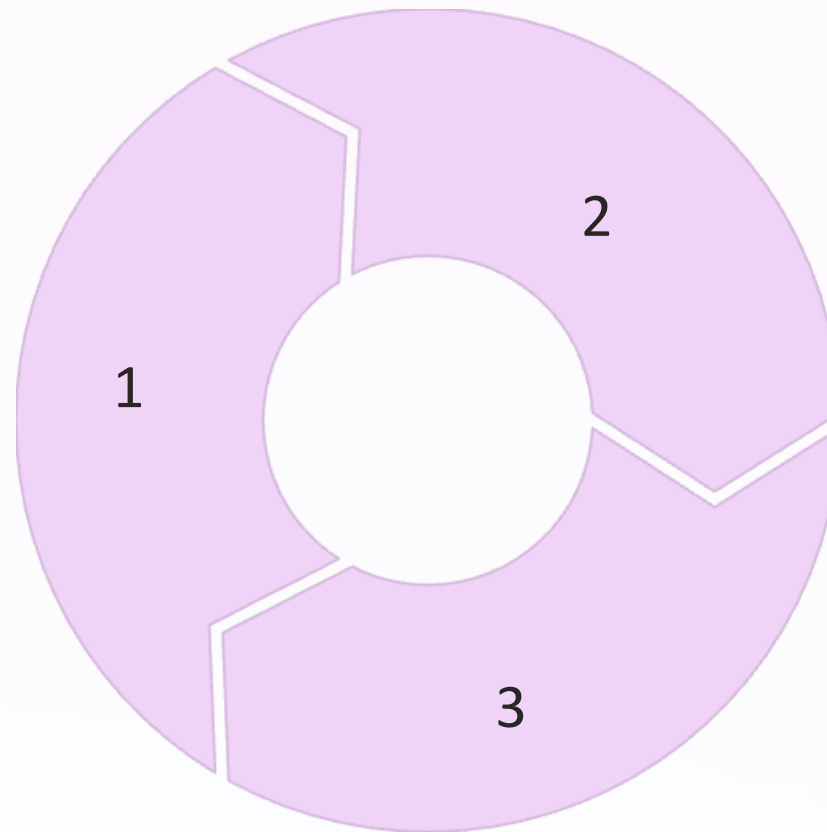
Зниження витрат на насіння, добрива та засоби захисту рослин на 10-30% завдяки оптимізації їх внесення. Підвищення урожайності на 15-20% за рахунок точного дотримання агротехнологій та своєчасного реагування на проблеми.

Скорочення витрат на паливо на 15-25% завдяки оптимізації траєкторій руху техніки та зменшенню перекриттів. Зниження негативного впливу на навколишнє середовище через раціональне використання хімічних препаратів. Покращення якості продукції та зменшення варіативності врожайності по полю до 5-10%.

# Геоінформаційні системи (ГІС)

## Роль ГІС у точному землеробстві

Інтеграція просторових даних з GNSS-приймачів для створення детальних карт полів з точністю до 2-5 см. Аналіз ґрунтових показників, рельєфу та історичних даних врожайності для оптимізації застосування агротехнологій.



## Цифрові карти для управління полями

Використання багат шарових карт для диференційованого внесення добрив (норма 50-300 кг/га), автоматичного керування технікою та моніторингу стану посівів із застосуванням NDVI-індексів. Зниження витрат на ресурси до 30% та підвищення врожайності на 15-20%.

## Обробка даних дистанційного зондування

Аналіз супутникових знімків та даних дронів для виявлення проблемних ділянок полів, прогнозування врожайності та планування агротехнічних заходів. Інтеграція з системами підтримки прийняття рішень.



# Забезпечення якості геодезичних даних

## Методи контролю точності

Застосування методу найменших квадратів для оцінки точності вимірювань і виявлення систематичних похибок. Періодичне калібрування електронних тахеометрів та GPS-приймачів згідно з державними стандартами з документуванням результатів перевірки. Використання контрольних точок з відомими координатами для перевірки результатів знімання та оцінки середньоквадратичної похибки.

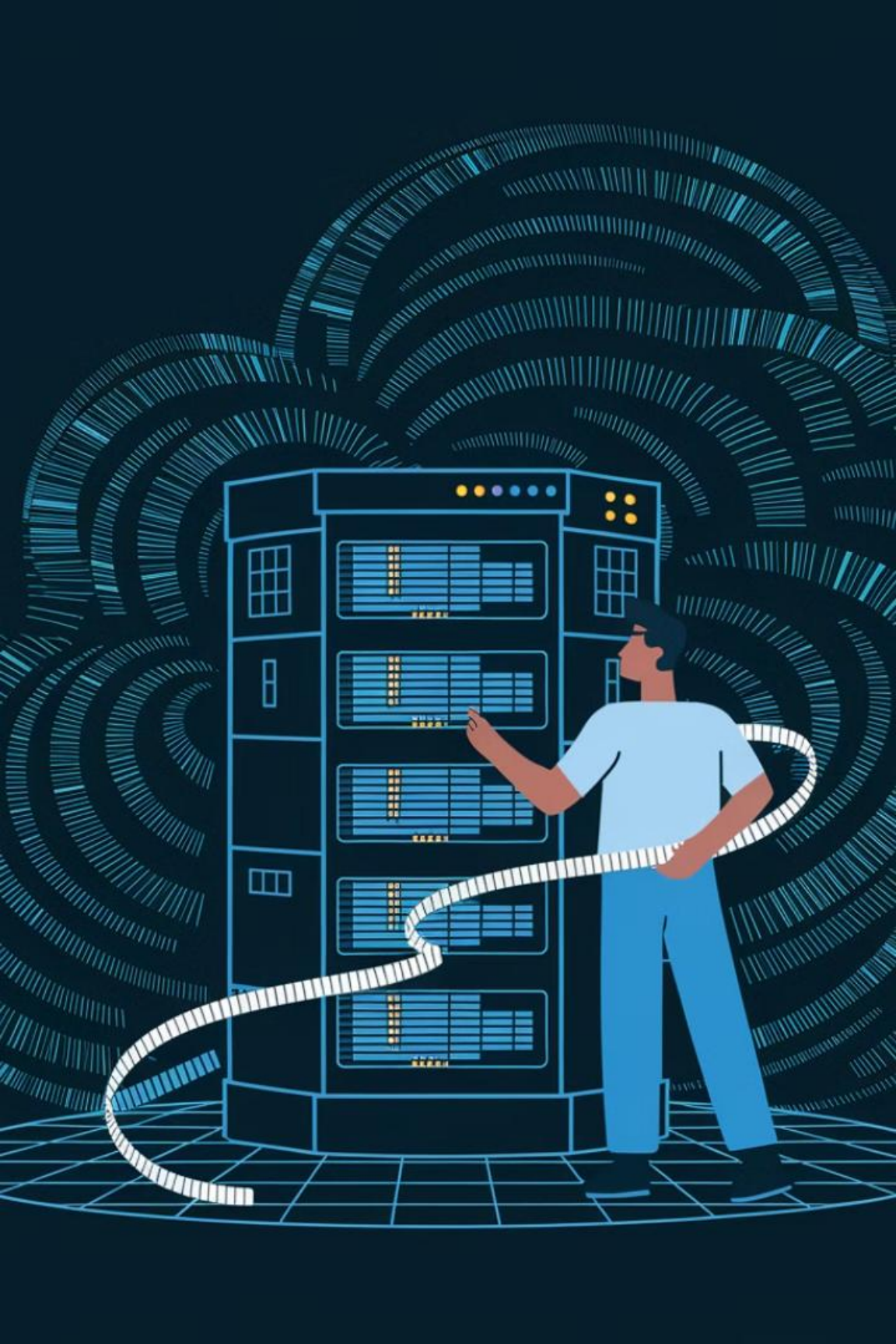
Впровадження багаторівневої системи контролю якості, що включає польовий контроль, камеральну перевірку та незалежну експертизу даних. Застосування методів подвійних спостережень для підвищення надійності результатів. Створення системи класифікації точності даних відповідно до міжнародних стандартів ISO 19157 та національних нормативів.

Особлива увага приділяється метрологічному забезпеченню геодезичних робіт, що включає регулярну повірку приладів у сертифікованих лабораторіях та дотримання міжнародних стандартів якості ISO 9001. Впровадження комплексних систем управління якістю (TQM) у геодезичні організації дозволяє забезпечити простежуваність всіх етапів виконання робіт та підвищити довіру до отриманих результатів.

## Автоматизовані системи контролю

Впровадження програмних алгоритмів для виявлення грубих помилок у цифрових моделях рельєфу та автоматичного коригування даних. Система автоматичного аналізу метаданих геодезичних знімків з формуванням звітів про якість та відповідність стандартам. Використання методів статистичного аналізу для забезпечення достовірності просторових даних при інтеграції в ГІС.

Розробка та впровадження автоматизованих систем валідації даних у реальному часі під час польових робіт. Інтеграція контролю якості з хмарними сервісами для миттєвої перевірки результатів вимірювань. Застосування нейромережевих алгоритмів для прогнозування похибок та оптимізації методики виконання геодезичних робіт залежно від умов середовища та вимог до точності.



# Правові аспекти використання

1

## Законодавче регулювання

Закон України "Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність" та Земельний кодекс регламентують використання геодезичних даних. Необхідне отримання ліцензій та дозволів для проведення робіт у особливо важливих об'єктах. Порушення законодавства тягне за собою адміністративну та кримінальну відповідальність.

2

## Конфіденційність та безпека

Впровадження багаторівневої системи захисту із використанням шифрування AES-256 та blockchain-технологій для захисту цілісності даних. Обов'язкове дотримання GDPR та національних стандартів при обробці персональних геолокаційних даних. Регулярний аудит безпеки та перевірка на вразливості.



# Тенденції розвитку автоматизованих систем

1

## Майбутнє технологій (2025-2030)

Інтеграція 5G мереж для передачі даних у режимі реального часу. Використання квантових обчислень для обробки великих масивів геодезичних даних. Розвиток систем доповненої реальності для візуалізації підземних комунікацій.

2

## Перспективні напрямки

Впровадження неймереж для автоматичного розпізнавання об'єктів на аерофотознімках (точність до 98%). Розробка хмарних платформ з можливістю колективного доступу до геопросторових даних. Мініатюризація БПЛА-комплексів з підвищенням автономності до 12 годин польоту.







# Висновки

1

## Ключові переваги

Підвищення точності вимірювань до міліметрів замість сантиметрів. Скорочення часу збору даних на 60-70%. Зниження операційних витрат на 40% та мінімізація ризиків людської помилки. Автоматизовані системи забезпечують цілодобовий збір даних у будь-яких погодних умовах.

2

## Виклики та можливості

Необхідність системного навчання спеціалістів новим технологіям, включаючи роботу з дронами та програмним забезпеченням для аналізу даних. Створення стандартів для забезпечення якості та сумісності геодезичних даних. Нові можливості використання у міському плануванні, моніторингу навколишнього середовища та розвитку BIM-технологій. Інтеграція з штучним інтелектом відкриває перспективи для предиктивної аналітики.