

Супутникові геодезичні системи: GNSS, GPS, ГЛОНАСС та інші

Супутникові геодезичні системи - це комплекси технологій, що використовують сузір'я супутників для визначення точних координат на поверхні Землі.

1 Різноманітність систем

Сьогодні існує декілька глобальних навігаційних систем: американська GPS, російська ГЛОНАСС, європейська Galileo та китайська BeiDou.

2 Принцип роботи

Усі системи базуються на вимірюванні часу проходження сигналу від супутника до приймача, що дозволяє визначити відстань та обчислити координати.

3 Сфери застосування

Геодезія, картографія, навігація, моніторинг деформацій, військова справа та багато інших галузей використовують супутникові вимірювання.



Що таке GNSS?

Глобальна навігаційна супутникова система

GNSS (Global Navigation Satellite System) – це сукупність супутникових систем, що забезпечують геопросторове позиціонування з глобальним покриттям. Технологія працює шляхом вимірювання відстаней до кількох супутників одночасно та використовує трилатерацію для визначення точних координат з точністю до декількох метрів або навіть сантиметрів.

Основні системи GNSS

До складу GNSS входять: американська GPS (24+ супутників), російська ГЛОНАСС (24 супутники), європейська Galileo (30 супутників), китайська BeiDou (35 супутників), японська QZSS та індійська IRNSS/NavIC. Сучасні геодезичні приймачі зазвичай приймають сигнали від декількох систем одночасно, що підвищує точність вимірювань.



SPACE SEGMENT
THE SPACE SEGMENT

CONTROL VHE
THE CONTROL SEGMENT

USER SEGMENT
THE USER SEGMENT

MONITORING
THE MONITORING SEGMENT

Основні компоненти GNSS

1 Космічний сегмент

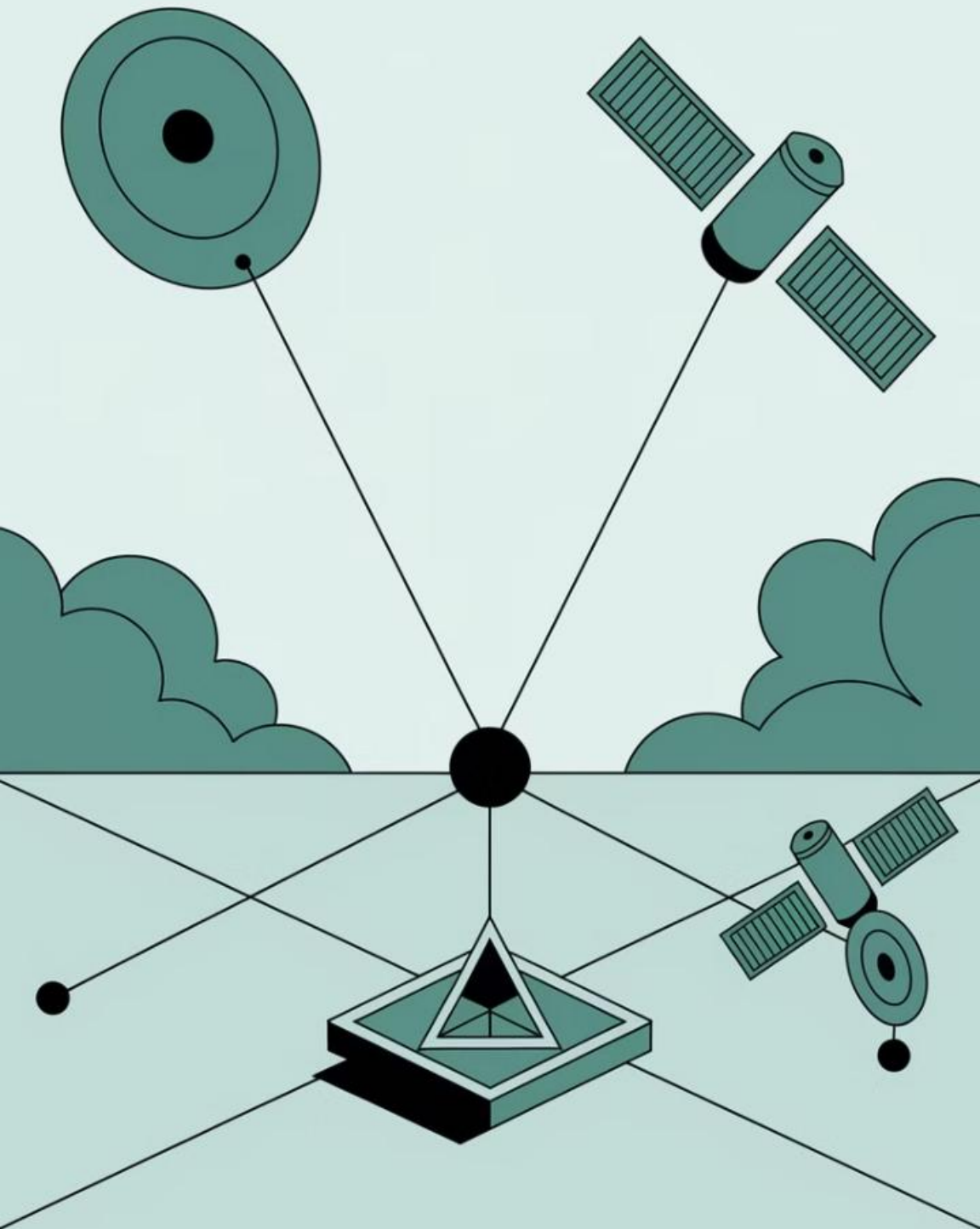
Сузір'я супутників (від 24 до 30 для GPS) на середній орбіті Землі висотою 20,000 км, які передають навігаційні сигнали з атомними годинниками на борту. Кожна система GNSS має власне сузір'я: GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), Galileo (ЄС), BeiDou (Китай).

2 Наземний сегмент

Глобальна мережа станцій моніторингу, що відстежують стан супутників, калібрують їхні атомні годинники, розраховують орбітальні параметри та оновлюють навігаційні повідомлення. Включає головні центри управління, які забезпечують цілодобову роботу всієї системи.

3 Користувацький сегмент

Різноманітні GNSS-приймачі в смартфонах, навігаторах, геодезичному обладнанні, які декодують сигнали з кількох супутників, вимірюють час поширення сигналу, та використовують триангуляцію для обчислення широти, довготи, висоти та часу з точністю до кількох метрів або навіть сантиметрів.



Принцип роботи GNSS

1

Триангуляція

Приймач отримує сигнали від мінімум 4 супутників одночасно для визначення своєї 3D-позиції (широта, довгота, висота). Кожен супутник створює сферу можливого розташування приймача.

2

Вимірювання часу

Атомні годинники на супутниках генерують надточні часові мітки (похибка до наносекунд). Приймач обчислює час проходження сигналу, враховуючи релятивістські ефекти та затримки в атмосфері.

3

Розрахунок

Процесор приймача розв'язує систему рівнянь, використовуючи метод найменших квадратів для компенсації помилок. Обчислює відстань до кожного супутника (15,000-20,000 км) та визначає координати з точністю до кількох метрів або сантиметрів.

Системи GNSS



GPS (США)

Найбільш поширена система, запущена у 1978 році.

Складається з 31 активного супутника, забезпечує точність до 3-5 метрів для цивільного використання.



ГЛОНАСС (Росія)

Розгорнута у 1993 році система з 24 супутників на орбіті.

Забезпечує точність 3-7 метрів та краще покриття в північних широтах.



Galileo (ЄС)

Європейська система з 30 супутників (24 активних та 6 запасних). Пропонує найвищу точність серед усіх GNSS — до 1 метра для цивільних користувачів.



BeiDou (Китай)

Повністю функціональна з 2020 року система з 35 супутників.

Забезпечує глобальне покриття з точністю 3-5 метрів та додаткові послуги передачі текстових повідомлень.



GPS: Global Positioning System

Розроблена США

GPS була розроблена Міністерством оборони США у 1973 році як система NAVSTAR GPS. Перший супутник запущено в 1978 році, а повна операційна готовність досягнута в 1995 році. Система розроблялася для військових цілей, але згодом стала доступною цивільним користувачам.

24+ супутники

Система GPS складається з мінімум 24 супутників на 6 орбітальних площинах на висоті близько 20,200 км. Кожен супутник обертається навколо Землі двічі на добу зі швидкістю 14,000 км/год та передає сигнали на частотах L1 (1575.42 МГц) та L2 (1227.60 МГц).

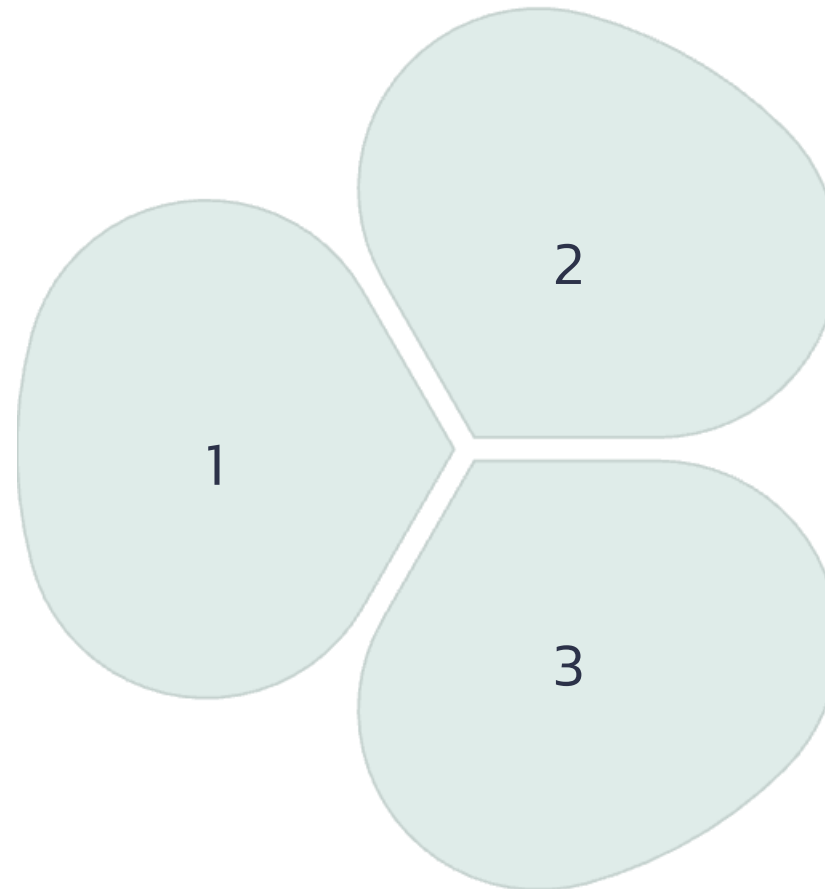
Глобальне покриття

GPS забезпечує точність позиціонування до 5-10 метрів у стандартному режимі та до сантиметрів у диференціальному режимі. Система працює в будь-яких погодних умовах, 24 години на добу, і не вимагає плати за використання. Для визначення позиції необхідний прямий зв'язок з мінімум 4 супутниками.

Структура GPS

Космічний сегмент

Складається з 24-32 супутників, що обертаються на середній орбіті Землі на висоті близько 20,200 км. Супутники передають радіосигнали з інформацією про їх положення та час.



Контрольний сегмент

Включає головну станцію управління в Колорадо-Спрінгс (США), 16 моніторингових станцій та 4 наземні антени, розташовані по всьому світу. Відстежує супутники, оновлює їх орбітальні дані та синхронізує атомні годинники.

Користувацький сегмент

Охоплює мільйони GPS приймачів різних типів: від спеціалізованих геодезичних пристроїв з точністю до міліметрів до масових смартфонів з точністю 2-5 метрів. Приймачі обробляють сигнали мінімум від 4 супутників для визначення 3D-позиції.



Принцип роботи GPS

Вимірювання часу

GPS приймач отримує сигнали від мінімум 4 супутників космічного сегменту. Кожен супутник передає унікальний навігаційний код та точний атомний час. Приймач вимірює різницю між часом відправлення та отримання сигналу з наносекундною точністю.

Псевдовідстані

Використовуючи швидкість світла (299,792,458 м/с), приймач розраховує відстань до кожного супутника. Вони називаються "псевдовідстанями" через похибки годинників та атмосферні затримки. Контрольний сегмент системи постійно корегує ці дані.

Координати

Застосовуючи триангуляцію та математичні алгоритми, користувачький сегмент GPS обчислює точні географічні координати (широту, довготу, висоту) з точністю до кількох метрів. Використання сигналів від більшої кількості супутників підвищує точність позиціонування.

ГЛОНАСС: ГЛОбальна НАвігаційна Супутникова Система

Розроблена в СРСР

ГЛОНАСС була запущена в 1982 році як військовий проект СРСР. Перший супутник "Космос-1413" був виведений на орбіту 12 жовтня 1982 року. Зараз систему підтримує Роскосмос (Російське космічне агентство).

24 супутники на 3 орбітах

Система ГЛОНАСС складається з 24 супутників, розташованих на трьох орбітальних площинах з нахилом 64.8° і висотою 19,100 км. Період обертання становить 11 годин 15 хвилин, що забезпечує повне глобальне покриття з точністю до 3-6 метрів.

Альтернатива GPS

ГЛОНАСС використовує частотне розділення каналів (FDMA) на відміну від GPS, що використовує CDMA. Сучасні приймачі часто поєднують обидві системи, підвищуючи точність визначення положення до 2 метрів і забезпечуючи надійну навігацію в складних умовах рельєфу та міської забудови.

Особливості ГЛОНАСС

Орбітальне розташування

Супутники ГЛОНАСС розташовані на трьох орбітальних площинах, розділених на 120° , з 8 супутниками в кожній площині. Вони обертаються на висоті 19,100 км з періодом 11 годин 15 хвилин.

Частотне розділення

ГЛОНАСС використовує FDMA (множинний доступ з частотним розділенням) на відміну від GPS. Кожен супутник передає на унікальній частоті в діапазонах L1 (1602-1615 МГц) та L2 (1246-1256 МГц).

Сумісність

Сучасні приймачі підтримують одночасну роботу з ГЛОНАСС та GPS, що покращує точність позиціонування на 30-40% у складних умовах, особливо в міських каньйонах та гірській місцевості.



Galileo: Європейська GNSS

Розроблена ЄС

Galileo розроблена Європейським Союзом у 2003 році як альтернатива американській GPS та російській ГЛОНАСС. Забезпечує повну незалежність Європи в навігаційних технологіях з інвестиціями понад 10 мільярдів євро.

30 супутників на MEO орбіті

Система Galileo складається з 30 супутників (24 робочих + 6 запасних) розташованих на середній орбіті Землі (MEO) на висоті 23,222 км в трьох орбітальних площинах з нахилом 56° до екватора.

Висока точність та надійність

Galileo забезпечує безпрецедентну точність позиціонування до 1 метра для цивільних користувачів та до 1 см у преміум-сервісах. Підтримує автентифікацію сигналу та стійкість до перешкод, що критично важливо для автономного транспорту.

BeiDou: Китайська навігаційна супутникова система

Розроблена Китаєм

BeiDou розроблена КНР з 1994 року як стратегічна альтернатива GPS.

Система пройшла три етапи розвитку: BeiDou-1 (2000), BeiDou-2 (2012) та BeiDou-3 (2020).

Глобальне покриття

З грудня 2020 року BeiDou забезпечує глобальне покриття з точністю до 1 метра для військових і 2.5 метрів для цивільних користувачів. Найвища точність доступна в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні.

35 супутників

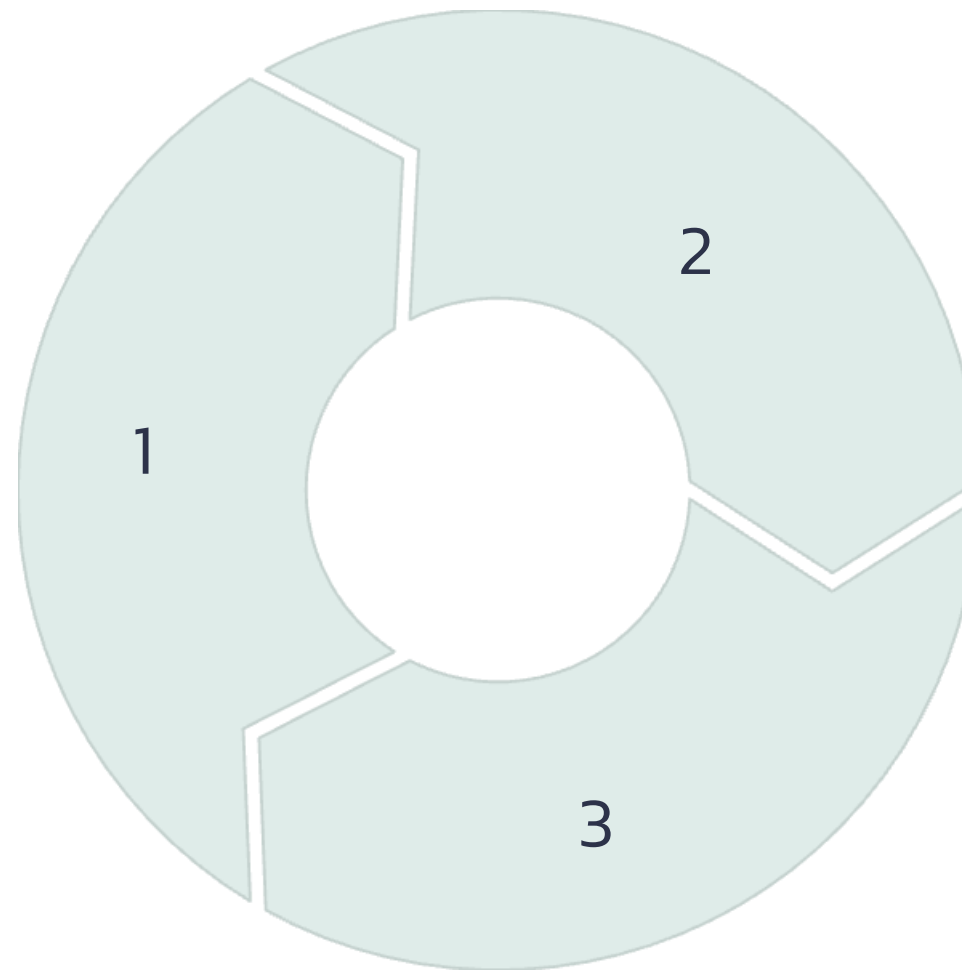
Система BeiDou складається з 35 супутників на трьох різних орбітах: геостаціонарній (GEO), середній (MEO) та геосинхронній (IGSO), що забезпечує стабільність і надійність сигналу.

Точність GNSS систем

Стандартна точність

GPS та ГЛОНАСС: 3-5 м на відкритій місцевості, до 10 м у міських умовах.

Galileo та BeiDou: 2-4 м при відкритому небі.



Фактори впливу

Іоносферні та тропосферні затримки сигналу, багатопроменеве відбиття, геометрія розташування супутників, точність атомних годинників, міська забудова.

Методи підвищення

Диференціальні системи корекції (WAAS, EGNOS, MSAS), RTK-технології з точністю до 1-2 см, використання двочастотних приймачів, алгоритми згладжування даних.

Диференціальні системи корекції

Ці супутникові системи значно підвищують точність стандартного GNSS з 5-10м до 1-3м шляхом трансляції поправок в реальному часі.



WAAS (США)

Покриває Північну Америку. Використовує мережу з 38 наземних станцій для корекції сигналів. Забезпечує точність до 1.5м горизонтально.



EGNOS (Європа)

Обслуговує країни Європи через 39 наземних станцій моніторингу. Забезпечує точність позиціонування до 1м для повітряної навігації та транспорту.



MSAS (Японія)

Працює в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні. Складається з 2 геостаціонарних супутників та наземної мережі. Забезпечує точність навігації до 2.2м.





RTK (Real-Time Kinematic) технологія

1

Принцип роботи

Використання фіксованої базової станції, яка передає корекційні дані на рухомий приймач (ровер) через радіо або мобільний зв'язок. Базова станція визначає похибки супутникових сигналів у реальному часі.

2

Підвищення точності

Забезпечує субсантиметрову точність (1-2 см по горизонталі, 2-3 см по вертикалі) у порівнянні з стандартною точністю GPS (2-5 метрів). Корекції передаються з частотою 1-20 Гц.

3

Застосування

Геодезичні вимірювання, точне землеробство, управління будівельною технікою, моніторинг деформацій інженерних споруд, безпілотні транспортні засоби, межування земельних ділянок.

PPP (Precise Point Positioning)

Принцип роботи

Використання точних орбітальних і годинникових даних супутників для високоточного позиціонування без необхідності в локальній базовій станції. Алгоритми PPP враховують тропосферні та іоносферні затримки сигналу.

Переваги

Забезпечує сантиметрову точність у будь-якій точці світу. Економічно ефективно рішення, що не вимагає встановлення та обслуговування базових станцій. Ідеально для віддалених регіонів.

Недоліки

Час ініціалізації від 20 до 40 хвилин для досягнення високої точності. Чутливість до переривань сигналу. Менша точність у реальному часі порівняно з RTK (5-10 см проти 1-2 см).



Застосування GNSS в геодезії

1 Опорні мережі

Створення точних геодезичних мереж з міліметровою точністю. Забезпечує основу для всіх видів геодезичних робіт та інтеграцію з національними координатними системами.

2 Топозйомка

Виконання топографічної зйомки місцевості з високою продуктивністю. Дозволяє швидко збирати просторові дані навіть у важкодоступних районах з точністю до 2-3 см.

3 Моніторинг

Моніторинг деформацій споруд та зсувів земної поверхні у реальному часі. Застосовується для контролю стану мостів, дамб та інших критичних інфраструктурних об'єктів з точністю до 1 мм.

GNSS у кадастрових роботах

Межі ділянок

Визначення меж земельних ділянок з точністю до 2-5 см завдяки RTK-технології. Дозволяє фіксувати координати поворотних точок безпосередньо на місцевості.

Кадастрові плани

Створення детальних кадастрових планів у цифровому форматі масштабу 1:500-1:2000. Автоматизована інтеграція з ГІС-системами та Державним земельним кадастром.

Надійність

Забезпечення точності та надійності вимірювань через використання мережі референцних станцій. Зниження впливу похибок вимірювань до мінімуму завдяки диференційним поправкам.

GNSS у будівництві

Розмітка

Високоточна розмітка будівельних майданчиків з точністю до 2-3 см для фундаментів, доріг та інженерних мереж. Зниження витрат на традиційну геодезичну розмітку до 40%.

Контроль

Автоматизоване керування будівельною технікою з RTK-точністю. Системи Machine Control для екскаваторів, бульдозерів та грейдерів з 3D-моделюванням будівельного проекту.

Моніторинг

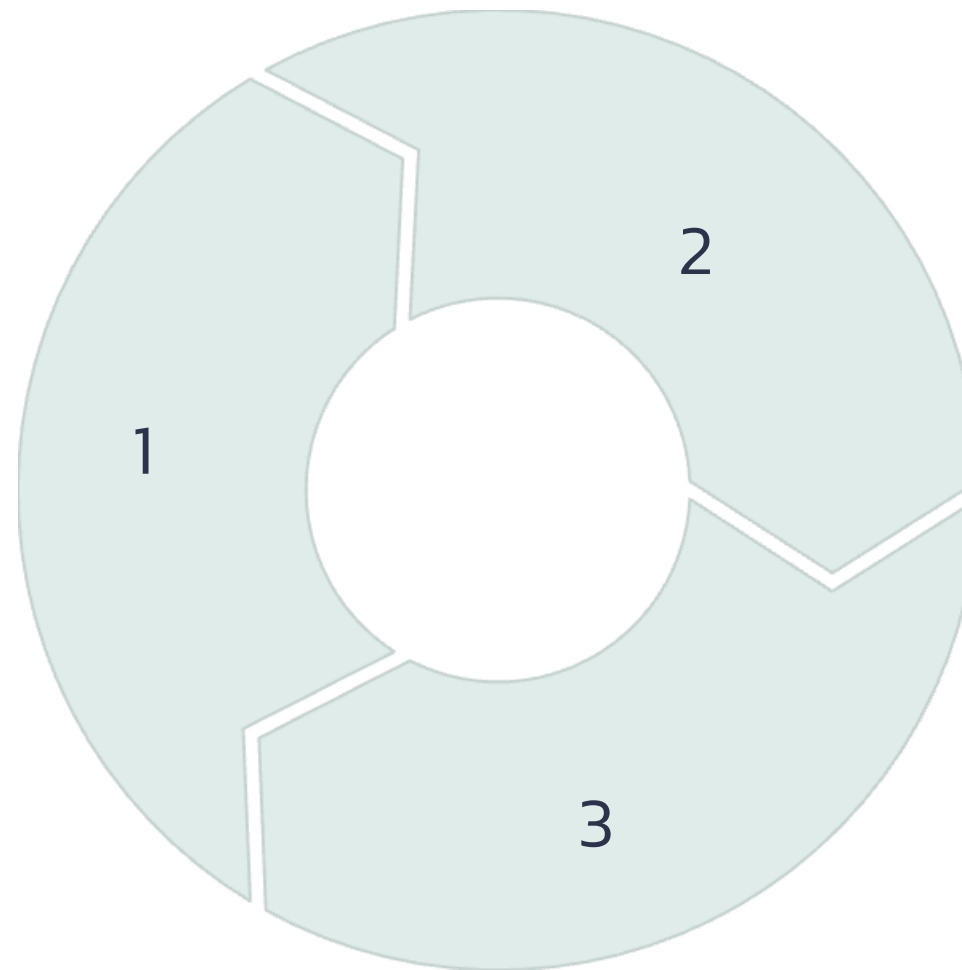
Безперервний моніторинг деформацій конструкцій з міліметровою точністю. Інтеграція з BIM-системами для відстеження прогресу будівництва та виявлення відхилень від проекту.



Застосування GNSS в ГІС

Збір даних

Високоточний збір просторових даних за допомогою GNSS-приймачів з точністю до сантиметра для створення детальних цифрових моделей місцевості та тематичних карт.



Актуалізація

Оперативне оновлення картографічної інформації в реальному часі, відстеження змін інфраструктури, природних об'єктів та транспортних мереж.

Інтеграція

Безшовна інтеграція з ДЗЗ, лідарними системами та мобільними ГІС-додатками для комплексного аналізу території та прийняття управлінських рішень.



GNSS у сільському господарстві

1

Точне землеробство

Застосування GNSS-навігації для автоматизованого керування сільгосптехнікою з точністю до 2 см, що дозволяє оптимізувати посадку, обробку та збір врожаю.

2

Моніторинг врожайності

Створення цифрових карт врожайності полів з прив'язкою до координат, аналіз динаміки продуктивності ділянок та визначення проблемних зон для цільового втручання.

3

Оптимізація

Точкове внесення добрив та засобів захисту рослин відповідно до потреб конкретних ділянок, що зменшує витрати на 15-30% та знижує хімічне навантаження на екосистему.

GNSS у геологічних дослідженнях

Картографування

Створення високоточних 3D-моделей геологічних структур з сантиметровою точністю.

Використання RTK-режиму для визначення координат тектонічних розломів та стратиграфічних меж.

Моніторинг

Безперервний моніторинг деформацій земної поверхні з міліметровою точністю. Виявлення повільних зсувів ґрунту для попередження зсувів та провалів у гірничодобувних районах.

Пошук копалин

Інтеграція GNSS із гравіметричними та магнітометричними датчиками для ідентифікації родовищ. Точне позиціонування геофізичних аномалій та створення детальних карт потенційних родовищ.

Обмеження та проблеми GNSS

Атмосфера

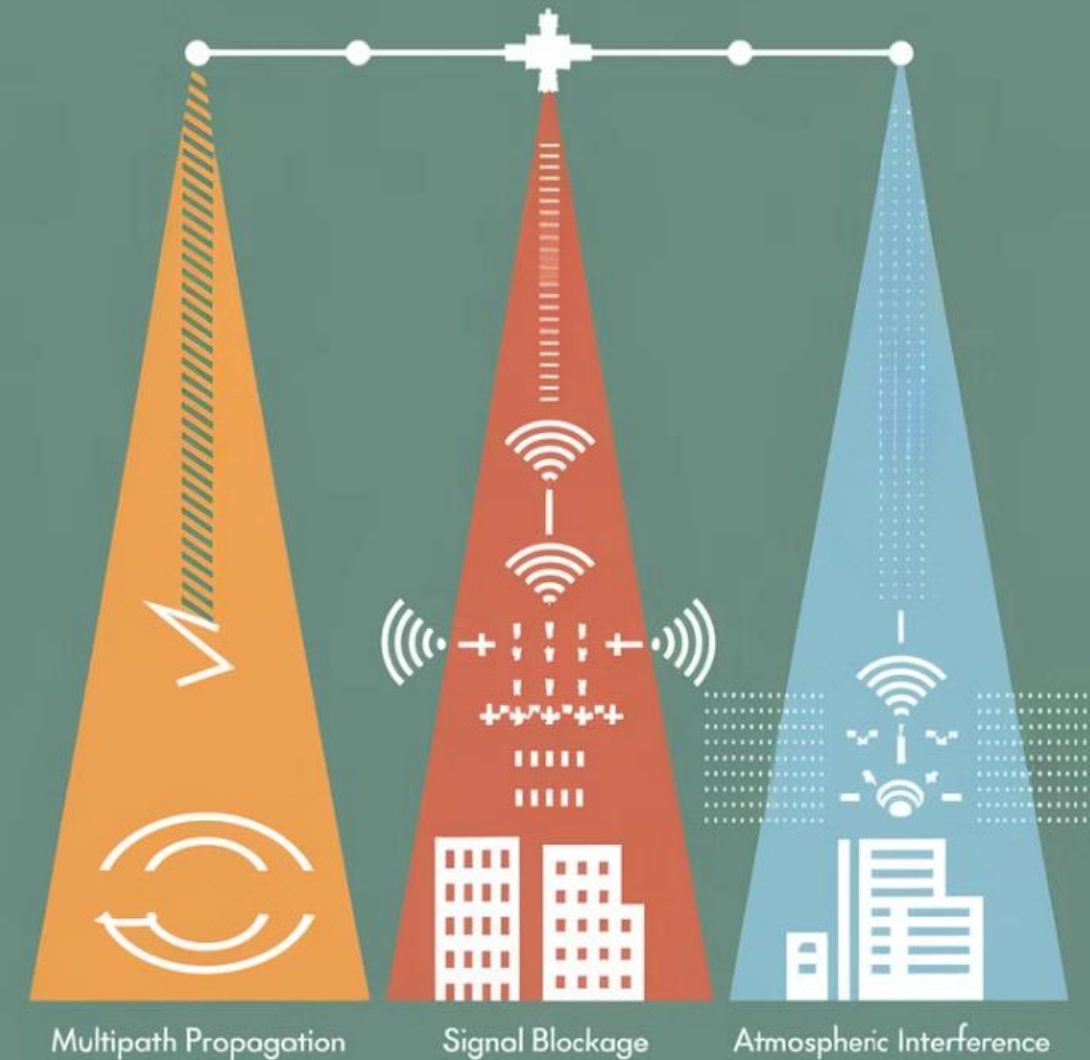
Іоносферні та тропосферні затримки спотворюють сигнал GNSS, знижуючи точність геологічного картографування до 5-15 метрів у складних умовах. Вологість і метеорологічні умови посилюють цей ефект у гірських районах.

Багатопроменевість

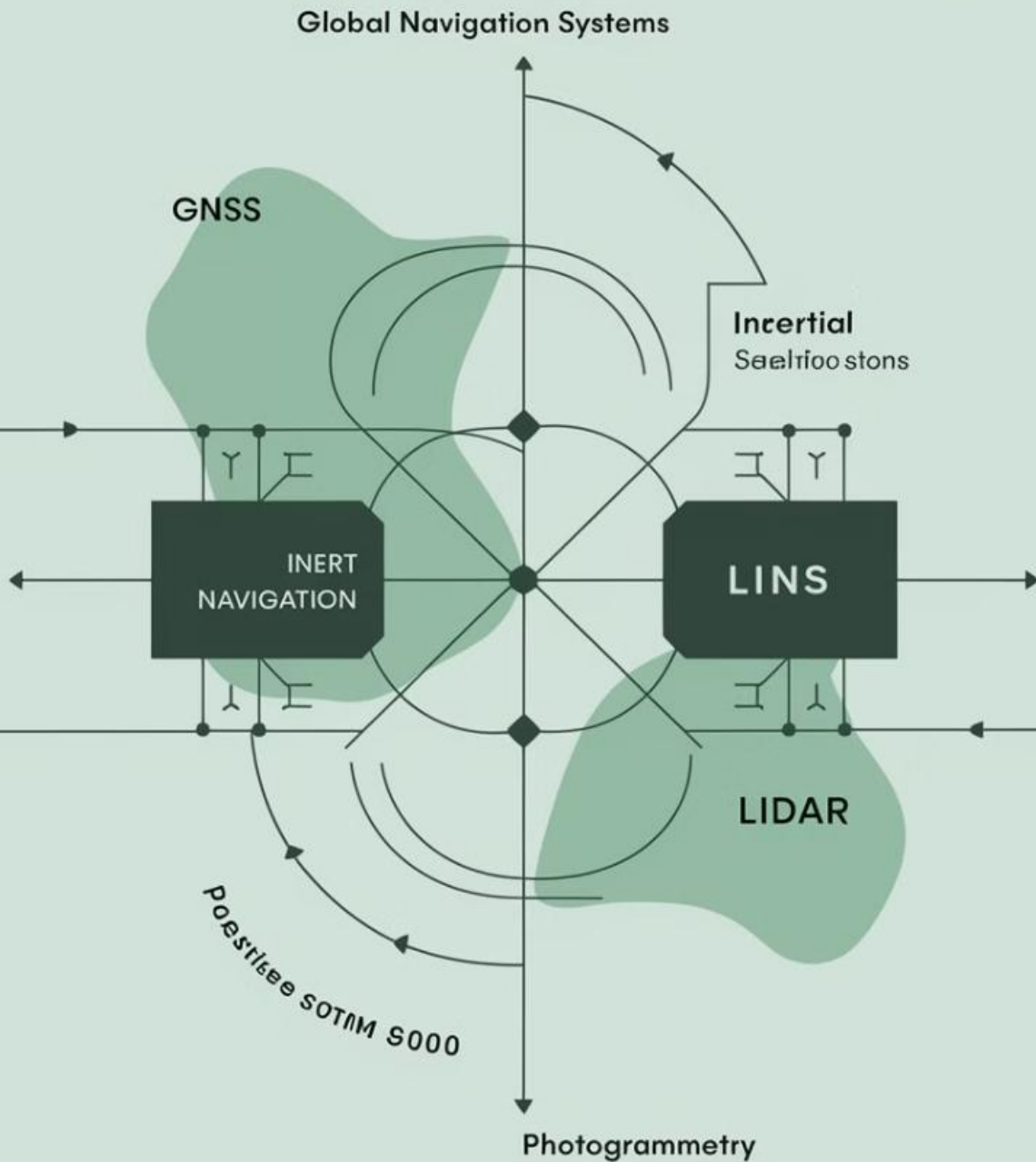
У геологічних дослідженнях поблизу скельних утворень та водойм відбувається відбиття сигналу GNSS, створюючи хибні координати з похибкою до 10-30 метрів. Це особливо критично при дослідженні печер та каньйонів.

Затінення

Густа рослинність, гірські хребти та глибокі кар'єри блокують сигнали GNSS, унеможливаючи роботу системи в глибоких шахтах та при лісових геологічних дослідженнях. Часткове затінення знижує геометричний фактор точності (GDOP).



Інтеграція GNSS з іншими технологіями



1

INS (Інерціальні навігаційні системи)

Доповнює GNSS під час втрати сигналу в тунелях або міських каньйонах. Забезпечує точні дані про орієнтацію та прискорення, компенсуючи короткочасні збої у GNSS-позиціонуванні.

2

LiDAR (Лазерне сканування)

Поєднання з GNSS створює високоточні геопросторові дані для картографування. Використовується для створення цифрових моделей рельєфу з сантиметровою точністю та 3D-моделювання інфраструктури.

3

Фотограмметрія

GNSS-геодегування знімків підвищує точність 3D-реконструкції. Застосовується для моніторингу земельних ресурсів, відстеження змін ландшафту та створення ортофотопланів для містобудування та кадастрових робіт.

Майбутнє GNSS технологій

1

Підвищення точності

Досягнення сантиметрової точності у масових пристроях та міліметрової у професійних рішеннях за рахунок нових алгоритмів обробки сигналів.

2

Нові сигнали

Впровадження сигналів L5/E5 з покращеним захистом від перешкод та багатопроменевого поширення для надійнішого позиціонування.

3

Розвиток систем

Інтеграція регіональних систем (BeiDou, QZSS, NavIC) з глобальними мережами для розширення покриття та стійкості до перешкод.

Ці технологічні вдосконалення відкривають нові можливості для геодезії, автономних транспортних засобів та точного землеробства, принципово змінюючи підходи до збору та обробки геопросторових даних.

GNSS приймачі для геодезії



Типи приймачів

Одночастотні L1 (базові роботи), двочастотні L1/L2 (підвищена точність), багаточастотні L1/L2/L5 (висока точність), мережеві базові станції (RTK).



Ключові характеристики

Точність (від см до мм), підтримка систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou), канали стеження, RTK функціональність, час автономної роботи, захист корпусу IP67+.



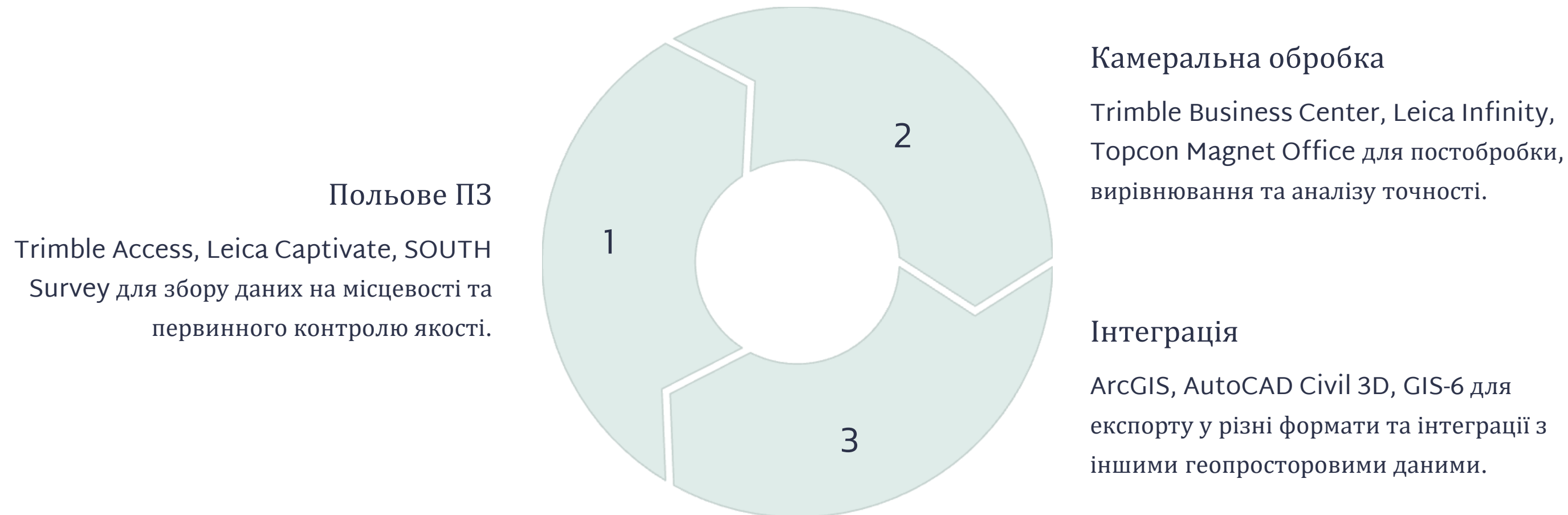
Вибір приймача

Залежить від завдань (топозйомка, розмічування, моніторинг), бюджету, умов місцевості, необхідності роботи в реальному часі та точності отриманих результатів.



Програмне забезпечення для обробки GNSS даних

Ефективна обробка геодезичних вимірювань потребує спеціалізованого програмного забезпечення на кожному етапі робіт.



Вибір програмного забезпечення залежить від типу приймача, вимог до точності та сумісності з іншими системами.

Нормативна база використання GNSS в Україні

Державні стандарти

ДСТУ 8774:2018 встановлює вимоги до точності вимірювань координат: для геодезичних мереж 1 класу - 5 мм, для топографічних зніманих - від 10 до 50 мм в плані залежно від масштабу.

Методики

Інструкція №25/0194 регламентує тривалість статичних спостережень (від 30 хв до 4 год), процедури калібрування обладнання та методи опрацювання результатів у спеціалізованому ПЗ.

Сертифікація

Обов'язкова метрологічна атестація GNSS приймачів кожні 2 роки згідно Постанови КМУ №1195. Дозволи на використання частот видаються НКРЗІ. Обладнання має відповідати європейським технічним регламентам.

Перспективи розвитку GNSS в Україні



1

Мережа станцій

Розгортання мережі з 50+ перманентних референцних GNSS-станцій до 2025 року з покриттям усіх областей України та забезпеченням точності RTK на рівні 2-3 см.

2

Інтеграція

Повна інтеграція української мережі з європейською системою EUPOS та підключення до сервісу Galileo HAS для підвищення надійності позиціонування в складних умовах міської забудови.

3

Підготовка

Запровадження сертифікованих навчальних програм у 15 університетах України для підготовки 2000+ фахівців з GNSS технологій щорічно, включаючи практичні курси з RTK та PPP методик.



Висновки та рекомендації

Переваги GNSS

Висока точність позиціонування (до 1-2 см), суттєве скорочення часу вимірювань (50-70%), та можливість роботи за будь-яких погодних умов.

Напрямки розвитку

Інтеграція з мережею європейських станцій, підвищення точності до міліметрів, удосконалення алгоритмів усунення іоносферних та тропосферних затримок сигналу.

Рекомендації

Впровадження GNSS технологій для моніторингу деформацій інженерних споруд, створення національної системи сертифікації GNSS обладнання, та організація регулярних тренінгів для фахівців-геодезистів.