МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МАРКШЕЙДЕРІЇ

Пояснювальна записка до випускної магістерської роботи

за спеціальністю 184 – Гірництво за другим (магістерським) рівнем вищої освіти ОПП «Маркшейдерська справа»

Тема роботи**: «Методи автоматизації маркшейдерського забезпечення гірничих робіт при відкритій розробці залізної руди»**

Виконав: магістрант групи ГГ-23м \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Ліщинський П. В.

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Долгіх Л. В.

Нормо-контролер \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Долгіх О. В.

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Долгіх О. В.

Кривий Ріг

2024

**РЕФЕРАТ**

**Магістерська робота включає сторінок 64, рисунків 12, таблиць 3, джерел 55.**

**Мета дослідження** полягає у формулюванні теоретичних і практичних засад автоматизації маркшейдерського забезпечення гірничих робіт під час відкритої розробки залізної руди з метою підвищення ефективності, точності та безпеки виконання маркшейдерських завдань.

**Предмет дослідження:** процеси маркшейдерського забезпечення гірничих робіт під час відкритої розробки залізної руди.

**Об'єкт дослідження:** методи та технології автоматизації маркшейдерського забезпечення, що охоплюють застосування геоінформаційних систем, лазерного сканування, безпілотних літальних апаратів та супутникових систем позиціонування.

Для досягнення визначеної мети в дослідженні застосовано комплекс **методів**, що включає: аналіз літератури та нормативних актів, порівняльний аналіз, моделювання та візуалізацію даних.

**Наукова новизна** дослідження полягає у створенні системного підходу до автоматизації маркшейдерського забезпечення гірничих робіт при відкритій розробці залізної руди, що включає: всебічне порівняння різних автоматизованих технологій та їх адаптацію до умов відкритих кар’єр; пропозиції щодо інтеграції геоінформаційних систем з лазерним скануванням та дрон-технологіями для формування єдиної цифрової моделі кар’єру

**Практичне значення** роботи полягає у можливості застосування отриманих результатів для: вдосконалення маркшейдерського забезпечення в гірничодобувній галузі, що дозволить зменшити час виконання вимірювань та знизити ризики помилок.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МАРКШЕЙДЕРІЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОРИСНІ КОПАЛИНИ, ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, КАР’ЄР, МАРКШЕЙДЕРІЯ

**З М І С Т**

[ВСТУП 5](#_Toc185199340)

[РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ 7](#_Toc185199341)

[1.1. Фотограмметрія близького радіусу дії 10](#_Toc185199342)

[1.2. Наземне лазерне сканування 10](#_Toc185199343)

[1.3. 3D-сканування 12](#_Toc185199344)

[РОЗДІЛ 2 ПОРІВНЯННЯ ТРАДИЦІЙНИХ І АВТОМАТИЗОВАНИХ МЕТОДІВ 14](#_Toc185199345)

[2.1 Точність вимірювань 14](#_Toc185199346)

[2.2 Швидкість виконання робіт 17](#_Toc185199347)

[2.3 Безпека праці 19](#_Toc185199348)

[2.4 Економічна ефективність 23](#_Toc185199349)

[2.5 Інтеграція з іншими системами 25](#_Toc185199350)

[РОЗДІЛ 3 ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ 29](#_Toc185199351)

[3.1 Геоінформаційні системи (ГІС): переваги та програмне забезпечення 29](#_Toc185199352)

[3.1.1 Програмне забезпечення для геоінформаційних систем 30](#_Toc185199353)

[3.1.2 Приклади впровадження ГІС у гірничодобувній галузі 31](#_Toc185199354)

[3.2 Лазерне сканування: принципи функціонування та специфіка використан-  
ня 32](#_Toc185199355)

[3.2.1 Характеристика застосування лазерного сканування в гірничодобувній промисловості 34](#_Toc185199356)

[3.2.2 Переваги та недоліки лазерного сканування 35](#_Toc185199357)

[3.2.3 Приклади реалізації лазерного сканування 36](#_Toc185199358)

[3.3 Безпілотні літальні апарати 36](#_Toc185199359)

[3.3.1 Види дронів у маркшейдерському забезпеченні 38](#_Toc185199360)

[3.3.1.1 Мультироторні дрони 38](#_Toc185199361)

[3.3.1.2 Фіксованокрилі безпілотники 40](#_Toc185199362)

[3.3.1.3 Гібридні дрони 41](#_Toc185199363)

[3.3.1.4 Підбір дрона для геодезичних робіт 42](#_Toc185199364)

[3.3.2 Програмне забезпечення для управління дронами в маркшейдерських роботах 42](#_Toc185199365)

[3.3.3 Вибір програмного забезпечення дрона 46](#_Toc185199366)

[3.4 Супутникові системи (GPS/GNSS) 47](#_Toc185199367)

[3.4.1 Програмне забезпечення для взаємодії з GPS/GNSS 49](#_Toc185199368)

[3.4.2 Інтеграція GNSS з автоматизованими системами 51](#_Toc185199369)

[3.4.3 Практичні приклади застосування GPS/GNSS 52](#_Toc185199370)

[3.5 Інтеграція робототехніки та автоматизованих тахеометрів 52](#_Toc185199371)

[3.5.1 Переваги автоматизованих тахеометрів у гірничій інженерії 53](#_Toc185199372)

[3.5.2 Інтеграційне програмне забезпечення 55](#_Toc185199373)

[ВИСНОВКИ 57](#_Toc185199374)

[СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ 60](#_Toc185199375)

# ВСТУП

Гірничодобувна індустрія сьогодні стикається з численними складними викликами, серед яких особливе значення мають питання підвищення продуктивності, забезпечення точності виконання робіт та дотримання високих стандартів безпеки. Однією з найзначніших складових цих процесів є маркшейдерське забезпечення, яке виконує вирішальну роль у проєктуванні, контролі та супроводі гірничих робіт. У відкритих кар’єрах, де видобувається залізна руда, маркшейдери відповідають за точне визначення параметрів кар’єру, контроль обсягів видобутку, моніторинг стану схилів і бортів кар’єру, а також виконання ряду інших завдань, що безпосередньо впливають на безпеку та ефективність робіт.

Методи маркшейдерських вимірювань, що використовувалися протягом десятиліть (наприклад, теодоліти або тахеометри), залишаються релевантними, проте мають значні обмеження. Вони вимагають значних часових і трудових ресурсів, залежать від екологічних умов та людського фактора, що може знижувати точність і надійність отриманих даних. У сучасних умовах, коли обсяги видобутку постійно зростають, а структура кар’єрів ускладнюється, традиційні методи виявляються недостатньо ефективними.

Вирішення цих питань стало можливим завдяки впровадженню передових автоматизованих технологій. Автоматизація маркшейдерських робіт є одним із ключових напрямків цифровізації гірничодобувної галузі. Сучасні інструменти, такі як геоінформаційні системи (ГІС), лазерне сканування, безпілотні літальні апарати (дрони), супутникові навігаційні системи (GPS/GNSS) та роботизовані платформи, суттєво трансформують підхід до маркшейдерського забезпечення. Вони забезпечують високу точність, суттєво зменшують час обробки даних і створюють можливість інтеграції маркшейдерських робіт у загальну цифрову інфраструктуру підприємства.

Ураховуючи значущість залізної руди як стратегічної сировини для економіки України та світового ринку, дослідження автоматизації маркшейдерських робіт для відкритої розробки родовищ є вкрай актуальним. Впровадження передових технологій у цьому секторі дозволить значно підвищити ефективність гірничих робіт, знизити витрати, забезпечити безпеку на робочому місці, що має вирішальне значення для сталого розвитку галузі.

Інтеграція цих технологій є не лише технічним завданням, а й суттєвим кроком у забезпеченні сталого розвитку гірничодобувної індустрії.

# РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Сучасна гірничодобувна промисловість дедалі інтенсивніше прагне до максимальної точності у видобутку корисних копалин, ефективної розробки рудних родовищ та раціоналізації виробничих процесів. Зростання глобальної конкуренції і попиту на мінеральну сировину в умовах світової індустріалізації призводить до необхідності використання передових технологій збору і обробки геопросторових даних. Увесь цикл гірничодобувних робіт – від розвідки та оцінки запасів до планування, розкривних робіт, транспортування та управління виробничою інфраструктурою – вимагає ретельного тривимірного картографування, регулярного моніторингу та детального обліку мінеральних ресурсів.

Останні роки позначилися суттєвим технологічним зрушенням: дистанційне зондування та суміжні цифрові методи підтримують ефективне та точне управління гірничими процесами. Зокрема, фотограмметрія у відкритих гірничих роботах стала потужним інструментом для тривимірного (3D) просторового аналізу, оскільки дає змогу з високою точністю отримувати детальні дані про рельєф, структуру покладів, об’єми та зміни у часі.

Тривимірний підхід до збору інформації про шахти та кар’єри дозволяє ефективно оцінювати запаси руди, планувати розкривні роботи, проєктувати меліоративні заходи та виявляти закономірності у поширенні рудних покладів. Для досягнення цієї точності необхідні великомасштабні фотограмметричні дослідження з високою роздільною здатністю (часто гігабайтний обсяг даних) та масштабами картографування від 1:1000 до 1:5000. При цьому важливу роль відіграють сучасні програмно-апаратні комплекси для оперативної обробки великих обсягів інформації. Крім того, залучення кваліфікованих спеціалістів із фотограмметрії, котрі мають глибокі знання у сфері відкритого видобутку, є запорукою якісної інтерпретації та чіткого виділення ресурсів.

За останнє десятиліття фотограмметрія та 3D-картографування набули неабиякого розвитку, успішно застосовуючись у точному плануванні робіт, обчисленні обсягів видобутих корисних копалин та контролі за виробництвом [1]. Ряд досліджень, зокрема [2-3], продемонстрували важливість точної 3D-реконструкції форм та визначення об’ємів для вирішення різноманітних завдань: від аналізу ерозійних процесів та оцінки видобутих ресурсів до геоінженерного планування. Цифрова фотограмметрія набуває популярності завдяки розвитку високороздільних камер, лазерних сканерів, а також методів генерації цифрових 3D-моделей поверхні [4-7].

Поєднання цифрових моделей рельєфу (ЦМР) з інформацією про кут падіння рудних пластів, відстань між горизонтами, технічні параметри гірничих виробок та інші інженерно-геологічні дані суттєво покращує точність визначення обсягів корисних копалин [8-9]. Цифрова фотограмметрія виявилася також надзвичайно ефективною для регулярного оновлення даних про запаси родовищ, кар’єрів та промислових інфраструктур, що зазвичай проводять з квартальним інтервалом [10]. Водночас слід враховувати конфігурацію рельєфу та характеристики супутніх об’єктів, оскільки вони можуть впливати на відкриті гірничі роботи [11-12].

У певних випадках матеріал у кар’єрі може змінювати своє положення, що вимагає повторного картографування [13]. Картографування запасів і кар’єрів потрібне для точних об’ємних вимірювань, а картографування інфраструктури – для підтримки планування виробничих процесів [14-16]. Висока точність даних критично важлива, оскільки вона впливає на оцінку запасів та розрахунок обсягів видобутку, формуючи основу для фінансових розрахунків із субпідрядниками [17]. Будь-яка помилка може призвести до суттєвих фінансових втрат. Крім того, проєкти зазвичай мають жорсткі терміни, тому дотримання графіків та вимог якості є принципово важливим.

У стандартній практиці, якщо не вказано інакше, спочатку здійснюється картографування та обчислення обсягів запасів, потім – виїмкових ділянок, а зрештою – інфраструктурних зон. Через стислі терміни оновлення даних дуже важливо, щоб працівники мали доступ до високоточних, чітко закодованих та стандартизованих картографічних матеріалів. Одним із нововведень стало використання лише альтернативних кадрів аерофотознімків (щоб знизити надмірне перекриття, яке могло сягати 80%), що дозволяє отримувати більш стабільну точність цифрових моделей рельєфу.

Розрахунки обсягів у зонах виїмки чи розкривних робіт є ключовими для багатьох інженерних застосувань, у тому числі цивільного будівництва та гірничодобувної галузі. Класичні геодезичні методи [18] довгий час застосовувалися для цих завдань. Проте сучасні підходи базуються на різниці між цифровими поверхнями – це забезпечує точність, економічність та оперативність обчислень. Завдяки технічному прогресу в обладнанні та програмному забезпеченні, обробку даних про рельєф можна виконувати швидше та точніше.

Точність 3D-реконструкції та оцінки об’єму відіграє визначальну роль в інженерних та гірничодобувних дисциплінах. Класичні методи, як-от трапецієподібні (призматичні) та методи на базі поперечних перерізів (Сімпсона, середніх значень) [19-20], відомі та перевірені часом, але не завжди здатні ефективно впоратися з обсягами робіт, які часто мають складну геометрію. Досягнення у фотограмметрії та лазерному скануванні пропонують альтернативні способи отримання високоточної 3D-інформації, в тому числі у важкодоступних або небезпечних зонах.

Сучасні геодезичні прилади, лазерні сканери та методи наземної фотограмметрії дають змогу швидко та безпечно отримувати точні дані про рельєф. Це особливо актуально для ділянок із ризиками або в місцях, де традиційні методи недоцільні. Застосування цифрової фотограмметрії та 3D-моделювання об’єктів стало надзвичайно перспективним напрямком досліджень, який активізувався останніми роками завдяки потужним комп’ютерним системам.

Точність обчислення об’єму залежить від якості подання поверхні. Більша кількість координатних точок (X, Y, Z) забезпечує детальніше уявлення про рельєф, проте збільшення кількості даних підвищує часові та фінансові витрати.

# 1.1. Фотограмметрія близького радіусу дії

Цифрова фотограмметрія близького радіусу дії пропонує вимірювання об’єктів із зображень, отриманих з малої відстані [22]. Цей метод не вимагає точного знання позиції камери, оскільки геометрія об’єкта встановлюється безпосередньо з перекриваючих знімків.

Для формування тривимірної моделі достатньо хоча б двох фотографій з різних ракурсів та відомої розмірної характеристики [23-24]. Визначення 3D координат ґрунтується на рівняннях співлінійності [22-25]. Надалі за допомогою фотограмметричного програмного забезпечення генеруються 3D-моделі, з яких можна знімати точні просторові виміри.

# 1.2. Наземне лазерне сканування

Наземні лазерні сканери (рис.1.1) – це високотехнологічні оптичні системи, що активно «просвічують» довкілля лазерним променем та реєструють відбите світло.

Изображение выглядит как гаджет, Электронное устройство, электроника, камера

Автоматически созданное описание

Рис.1.1 Лазерний сканер Leica RTC360

Вони дозволяють оперативно отримувати 3D-хмару точок із поверхні об’єктів, створюючи геометричні моделі з високою щільністю вибірки. Поєднання з пасивними ПЗЗ-камерами дозволяє накладати кольорову інформацію на 3D-модель, отримуючи віртуальну реальність об’єкта. Ця технологія корисна у ситуаціях з обмеженим доступом або недостатнім освітленням [26]. Вона широко застосовується в інженерії, будівництві, архітектурі для документування та аналізу (рис.1.2).

Изображение выглядит как природа, снимок экрана, гора, пещера

Автоматически созданное описание

Рис.1.2 3D модель на основі лазерного сканування

Вимоги до точності залежать від конкретних інженерних задач. Надмірна точність, не виправдана потребами проєкту, призводить до зайвих витрат. Тому оцінка точності та корекція результатів методом найменших квадратів або поширення похибок є важливими аспектами контролю якості [26]. Для лазерних сканерів, які забезпечують величезну кількість 3D-координат за короткий час, точність окремих вимірювань нерідко перевіряють шляхом порівняння модельованих об’єктів із хмарами точок. Специфікації точності, надані виробниками, не завжди можна безпосередньо порівняти, і довіра до них формується на основі практичних експериментів та наукових досліджень [26-31].

Для сканерів далекої дії дальність визначається методом часу проліту сигналу або порівнянням фазового зсуву. Прилади з триангуляційним принципом роботи мають точність, що знижується зі зростанням відстані, тоді як далекомірні сканери мають більш рівномірні показники точності. Зазвичай точність наземного лазерного сканера становить близько 0,2 мм на 1 м [32-33].

# 1.3. 3D-сканування

В останні роки значний імпульс отримали методи 3D-сканування, лазерного та фотограмметричного картографування, зокрема за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) (рис 1.3). Ці технології дають змогу швидко отримувати детальні цифрові 3D-моделі для великомасштабних досліджень, наприклад для моніторингу кар’єрів [34–36], вивчення зсувних явищ [37], визначення обсягів видобутку [38], а також для точних розрахунків об’ємів нерегулярних тіл складної форми [39].

Изображение выглядит как дизайн

Автоматически созданное описание

Рис. 1.3 Побудова маршруту БПЛА та підключення пульта управління

Класичний підхід до обчислення об’єму передбачає побудову ЦМР та подальшу інтерполяцію хмари точок у регулярну сітку [40]. Однак нерівномірність, складна форма та неоднорідний розподіл точок можуть спричиняти помилки [41–42]. Хмари точок забезпечують більш щільну вибірку, тому обчислення об’єму безпосередньо за ними є перспективнішим, даючи змогу знизити похибки моделювання.

Методи обчислення об’єму з хмар точок поділяються на дві основні категорії: зворотне моделювання та сегментація шляхом зрізання хмари [43]. Зворотне моделювання передбачає формування трикутних сіток і може бути обчислювально складним [44–46]. Натомість метод зрізу хмари точок подрібнює її на мікроелементи та підсумовує їх об’єми. Цей підхід може ретельно контролювати точність [47–48].

Дослідники вивчали підходи до зрізання хмар точок, вдосконалюючи алгоритми пошуку контурів та інтеграції результатів [49–54]. Проте складні умови, нерівномірна густота точок та наявність множинних контурів залишаються викликом для підвищення точності обчислень у кар’єрних умовах.

Дані кар’єрів часто містять нерівні поверхні, фрагментарні структури порід та прилеглі природні об’єкти. Вони використовуються для формування цифрової моделі рельєфу, яка необхідна для визначення об’ємів вилучених корисних копалин. Ці об’єми надалі впливають на розрахунки з підрядниками, встановлюючи фінансові параметри проєктів [55].

Після збору польових даних вони повинні бути очищені та стандартизовані. Використання інструментів статистичного аналізу (наприклад, «статистика об'єктів перегляду», «інструмент пошуку перетину») дозволяє переконатися у відсутності неправильних кодів, некоректних даних та невідповідних елементів у наборах вимірювань. Ця стадія є критично важливою для забезпечення якості кінцевих результатів.

Контроль якості, верифікація та точність результатів повинні чітко відповідати вимогам проєкту. Якщо результати не досягають заданих стандартів, керівник проєкту має бути негайно проінформований. До початку подальших стадій робіт необхідно досягти узгодженості результатів з установленими критеріями точності.

# РОЗДІЛ 2 ПОРІВНЯННЯ ТРАДИЦІЙНИХ І АВТОМАТИЗОВАНИХ МЕТОДІВ

Еволюція маркшейдерських методів через автоматизацію суттєво трансформувала виконання робіт, точність отриманих даних та загальну ефективність процесів. Традиційні методи, що застосовувалися раніше, ґрунтувалися на великій частці ручної праці, тривалих обчисленнях та використанні елементарного обладнання, такого як теодоліти або оптичні рівні. Автоматизовані методи використовують сучасні технології, такі як дрони, лазерні сканери, автоматизовані тахеометри, супутникові системи (GPS/GNSS) та робототехніку.

Розглянемо основні аспекти, за якими можна порівняти традиційні та автоматизовані методи, акцентуючи увагу на їхньому впливі на точність, швидкість, безпеку та економічність.

# 2.1 Точність вимірювань

Точність вимірювань є критично важливим аспектом маркшейдерського забезпечення, оскільки вона визначає якість аналізу рельєфу, планування гірничих робіт та контроль за виконанням видобутку. На відміну від традиційних методів, автоматизовані технології забезпечують суттєво вищу точність, що сприяє ефективнішому вирішенню завдань у відкритих розробках залізної руди.

Характеристики традиційних методів. Традиційні методи маркшейдерських вимірювань ґрунтуються на застосуванні інструментів, таких як:

* теодоліти (для вимірювання кутів у горизонтальній і вертикальній площинах);
* оптичні або електронні тахеометри (для вимірювання відстаней та кутів);
* нівеліри (для визначення різниці висот між точками).

У традиційних методах багато етапів вимірювання здійснюються вручну. Наприклад, оператор вручну наводить теодоліт на відбивач або ціль, що може викликати похибки через тремтіння, неправильну калібровку інструмента або суб'єктивну оцінку.

Традиційні методи передбачають вимірювання лише вибраних точок, відомих як ключові точки рельєфу. Це викликає прогалини між вимірюваннями, що знижує точність розробленої моделі.

У кар'єрах з нерівним рельєфом або обмеженою видимістю точність знижується через складнощі в точному встановленні обладнання або наведення приладу.

Теодоліти і традиційні тахіметри мають обмеження по точності, як правило, в межах від 1 до 5 мм на 100 м.

Приклади помилок у традиційних методах:

* помилка визначення координат точки внаслідок некоректного налаштування теодоліта;
* неточності в визначенні кутів при застосуванні інструмента з низьким класом точності;
* накопичення помилок під час ручного обчислення даних.

Сучасні автоматизовані технології охоплюють:

* лазерне сканування (LiDAR) забезпечує мільйони точок даних за хвилину з міліметровою точністю.
* супутникові системи GPS/GNSS забезпечують визначення координат з точністю 1-2 см у режимі RTK (кінематика в реальному часі).
* автоматизовані тахеометри об'єднують функції теодоліта, дальноміра та комп'ютера, здійснюючи вимірювання без людського втручання.

Переваги автоматизованих методів:

1. Висока точність завдяки автоматизації процесу

Лазерні сканери формують хмару точок з похибкою в межах 1–3 мм. Це забезпечує високу деталізацію рельєфу кар'єру або складного профілю схилів. Автоматизовані тахеометри самостійно фокусуються на цілі, усуваючи похибки, пов'язані з людським фактором.

1. Безконтактні вимірювання

Лазерне сканування та GNSS забезпечують збір даних на значних відстанях без потреби фізичної присутності на кожній точці. Це зменшує ймовірність помилок, пов'язаних із некоректною установкою інструмента.

1. Тривимірна деталізація

Лазерні сканери виробляють мільйони точок даних, що сприяє створенню детальних тривимірних моделей з мінімальними відхиленнями.

1. Стабільність функціонування в екстремальних умовах

Автоматизовані системи функціонують ефективно в кар'єрах з нерівним рельєфом, складними погодними умовами або в умовах обмеженої видимості, гарантуючи стабільну точність (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1

**Порівняльна таблиця точності**

| **Метод** | **Точність вимірювань** | **Кількість точок/даних** | **Залежність від людського фактора** |
| --- | --- | --- | --- |
| **Теодоліт** | 3–5 мм на 100 м | Обмежена кількість точок | Висока |
| **Ручний тахеометр** | 1–3 мм на 100 м | Обмежена кількість точок | Середня |
| **Лазерний сканер** | 1–3 мм незалежно від відстані | Мільйони точок за хвилину | Низька |
| **Автоматизований тахеометр** | 1–2 мм на 100 м | Велика кількість точок | Низька |
| **GPS/GNSS (RTK)** | 1–2 см | Геоприв’язка з високою деталізацією | Низька |

Традиційні методи забезпечують адекватний рівень точності для елементарних завдань, проте вони обмежені в деталізації та значною мірою залежать від людського фактора.

Автоматизовані методи забезпечують точність на принципово новому рівні, усуваючи похибки, пов'язані з людським фактором, і гарантують високу деталізацію навіть на великих площах.

Перехід до автоматизованих технологій в маркшейдерському супроводі дозволяє створювати високоточні і детальні моделі, що особливо важливо для великих залізорудних кар'єрів.

# 2.2 Швидкість виконання робіт

Швидкість виконання маркшейдерських робіт має вирішальне значення при видобутку залізної руди відкритим способом. Ефективна організація гірничих процесів залежить від швидкості збору та аналізу даних. Традиційні методи, що ґрунтуються на ручних обчисленнях і оптичних інструментах, значно відстають від сучасних автоматизованих технологій, які застосовують дрони, лазерне сканування, автоматизовані тахеометри та супутникові системи.

Основні етапи діяльності в традиційній маркшейдерії

1. Підготовка до вимірювань

Підготовка охоплює встановлення геодезичних точок (реперів) та обладнання. Цей етап вимагає значного часу, оскільки точність налаштувань визначає коректність майбутніх вимірювань.

1. Здійснення польових робіт

Вимірювання проводяться за допомогою теодолітів, оптичних або електронних тахеометрів. Кожна точка вимірюється вручну, що потребує точного націлювання інструмента, встановлення відбивача, а також розрахунку відстаней і кутів.

1. Обробка даних

Зібрані дані фіксуються у польових журналах, після чого здійснюються ручні обчислення або введення даних у програмне забезпечення для генерації карт і моделей.

Швидкість виконання:

* обмежена через ручне виконання кожної стадії. наприклад, обхід великого кар'єру може тривати кілька днів;
* кількість вимірювань залежить від фізичних можливостей маркшейдера пройти об'єкт і здійснити всі необхідні зйомки.

Сучасні автоматизовані технології істотно зменшують час на кожному етапі маркшейдерських робіт:

1. Підготовка до вимірювань

Автоматизовані тахеометри вимагають незначних налаштувань. Вони автономно націлюються на об'єкт і здійснюють вимірювання.

Використання супутникових приймачів GNSS сприяє швидкому створенню геодезичної мережі з мінімальними витратами часу.

Дрони можуть бути запущені практично без підготовки, що дозволяє негайно розпочати зйомку.

1. Здійснення польових робіт

Дрони: здійснюють фотозйомку обширних територій у найстисліші терміни. Наприклад, обліт території площею 50 гектарів займає 20-30 хвилин.

Лазерне сканування: забезпечує отримання мільйонів точок даних за хвилину. Одне встановлення сканера має радіус дії до 300 метрів.

Автоматизовані тахеометри: здійснюють вимірювання автономно, самостійно коригуючи позицію інструмента та фіксуючи координати точок.

1. Обробка даних

Дані автоматизованих систем негайно фіксуються у цифровому форматі, що усуває потребу в ручному введенні.

Спеціалізоване програмне забезпечення, таке як Pix4D, Agisoft Metashape або Leica Infinity, автоматично обробляє дані, генеруючи готові 3D-моделі, ортофотоплани або звіти.

Аналіз переваг швидкості автоматизації:

1. Оптимізація часу при виконанні масштабних проектів

Автоматизація сприяє зменшенню тривалості зйомки в 5–10 разів, особливо на великих територіях. Зменшується обсяг ресурсів, необхідних для повторних вимірювань або корекції помилок.

1. Ефективність у прийнятті рішень

Завдяки швидкій обробці даних, маркшейдери можуть оперативно надавати керівництву актуальну інформацію про стан кар'єру, що сприяє ефективному плануванню видобувних робіт.

1. Здатність функціонувати в режимі реального часу

Використання ГНСС-обладнання та автоматизованих теодолітів дозволяє отримувати дані в режимі реального часу, що особливо вигідно для моніторингу змін після вибухонебезпечних операцій.

1. Зменшення залежності від людського чинника

Автоматизовані системи зменшують вплив людських помилок, які можуть затримувати процес або вимагати повторних вимірювань.

Швидкість виконання завдань є одним із найвражаючих показників, у яких автоматизовані методи суттєво перевершують традиційні. Завдяки можливостям дронів, лазерного сканування, автоматизованих тахеометрів та сучасного програмного забезпечення, час виконання маркшейдерських завдань значно скорочується. Це сприяє не лише швидкому отриманню даних, але й підвищенню загальної ефективності гірничих робіт, зменшенню витрат та оперативному реагуванню на зміни умов у кар’єрі. Автоматизація стає суттєвим елементом майбутнього маркшейдерії.

# 2.3 Безпека праці

Безпека працівників у гірничій промисловості завжди залишалася одним із найважливіших завдань, особливо під час відкритої розробки залізної руди. Геодезичні роботи в кар'єрах супроводжуються численними ризиками: стрімкі схили, ймовірність обвалів, важкодоступні ділянки та близькість до зон вибухових робіт. Традиційні методи часто вимагали фізичної присутності маркшейдерів у потенційно небезпечних зонах. Автоматизовані технології сприяють зменшенню цих ризиків, замінюючи людей дронами, роботами та дистанційними системами.

Основні ризики класичних методів:

1. Фізична присутність у ризикованих зонах

Маркшейдери зобов'язані особисто бути присутніми в кар'єрі для проведення вимірювань, що ставить під загрозу їхнє здоров'я та життя. Це стосується діяльності на крутих схилах, у безпосередній близькості до вибухових робіт або в зонах, схильних до обвалів.

1. Діяльність у екстремальних умовах

Традиційні методи включають використання інструментів, таких як теодоліти або оптичні рівні, що потребують тривалого перебування працівника в зоні вимірювання. Метеорологічні умови (дощ, вітер, спекотна погода) можуть ускладнювати виконання завдань.

1. Ризик отримання травм

Діяльність на нестабільному ґрунті або в близькості до рухомого транспорту в кар'єрі створює додаткові ризики для маркшейдерів. Технічні помилки або несподівані події, такі як зсуви ґрунту, часто викликають непередбачувані ситуації.

1. Ризики, пов'язані з людським фактором

У небезпечних умовах людина може помилитися через втому, неуважність або поспіх, що підвищує ймовірність аварій.

Ситуації з підвищеним ризиком:

* вимірювання в зоні обвалу;
* діяльність у обмежених або крутих проходах;
* операції поблизу важкої техніки під час її переміщення.

Автоматизовані технології, включаючи дрони, автоматизовані тахеометри, лазерні сканери та робототехніку, суттєво трансформують методи забезпечення безпеки:

1. Відсутність потреби у фізичній присутності в небезпечних зонах

Дрони здійснюють аерозйомку великих площ з висоти, усуваючи потребу маркшейдера наближатися до небезпечних зон.

Автоматизовані тахеометри функціонують дистанційно, передаючи дані в реальному часі, що дозволяє здійснювати вимірювання без необхідності перебування в зоні ризику.

1. Завдання для виконання в небезпечних умовах

Наземні роботи, оснащені сенсорами та лазерними сканерами, здатні переміщатися по складному рельєфу та здійснювати вимірювання в важкодоступних зонах.

Роботи застосовуються для спостереження за крутістю схилів або територіями з потенційними зсувами, зменшуючи людську участь у небезпечних процесах.

1. Моніторинг в режимі реального часу

Системи лазерного сканування та GNSS-обладнання передають дані в режимі реального часу, що дозволяє фахівцям дистанційно моніторити ситуацію. У випадку загрози (наприклад, зсуву ґрунту) можливо оперативно реагувати без ризику для працівників.

1. Удосконалення трудових умов

Застосування автоматизованих методів дає змогу маркшейдерам виконувати більшість завдань з безпечного місця, наприклад, з мобільного офісу, оснащеного відповідним програмним забезпеченням.

Порівняльна таблиця традиційних та автоматизованих методів наведена в таблиці 2.2.

Переваги автоматизації для безпеки:

1. Скорочення травматизму

Працівники не піддаються небезпеці під час виконання завдань у ризикованих зонах.

1. Своєчасна реакція на загрози

Моніторинг у реальному часі сприяє ранньому виявленню потенційно небезпечних ситуацій.

Таблиця 2.2

**Порівняльна таблиця безпекового фактору**

| **Критерій** | **Традиційні методи** | **Автоматизовані методи** |
| --- | --- | --- |
| **Фізична присутність у зоні ризику** | Постійна потреба | Мінімальна або відсутня |
| **Робота у важкодоступних місцях** | Виконується вручну | Виконують дрони та роботи |
| **Ризик травмування** | Високий | Зведений до мінімуму |
| **Моніторинг стану об’єкта** | Обмежений | У реальному часі |
| **Залежність від погодних умов** | Висока | Низька |
| **Умови праці** | Часто складні | Комфортні, дистанційне виконання робіт |

1. Зменшення фізичного та психологічного стресу

Співробітники виконують свої обов'язки дистанційно, знаходячись у зручних умовах, що знижує втому та ймовірність помилок.

1. Доступ до важкодоступних територій

Механізми та безпілотники здатні функціонувати в умовах, де присутність людини є неможливою або надто ризикованою.

Ситуації, в яких автоматизовані методи є незамінними:

1. Зони обвалів

Традиційні методи потребують фізичної присутності, тоді як автоматизація усуває цей ризик.

1. Вибухові процедури

Дрони здійснюють віддалений моніторинг, що дозволяє оцінити стан території після вибуху.

1. Моніторинг стану схилів

Автоматизовані тахеометри або роботи постійно моніторять переміщення ґрунту, запобігаючи нещасним випадкам.

Безпека працівників є одним із найважливіших аргументів на підтримку автоматизації маркшейдерських робіт. Традиційні методи, що потребують безперервної фізичної присутності маркшейдерів у кар'єрі, породжують численні ризики для здоров'я та життя. Автоматизовані технології зменшують ці ризики, забезпечуючи виконання більшості завдань віддалено. Завдяки дронам, роботам та автоматизованим тахеометрам, гірничі підприємства підвищують ефективність робіт і забезпечують безпеку працівників на новому рівні.

# 2.4 Економічна ефективність

Економічність є одним із основних аспектів маркшейдерського забезпечення у відкритій розробці залізної руди. У зв'язку з високими витратами на гірничі роботи, економічно ефективні рішення сприяють зниженню витрат і підвищенню рентабельності підприємств. У цьому контексті традиційні методи мають численні обмеження через значну залежність від ручної праці, тривалість виконання завдань та потребу в повторних вимірюваннях. Автоматизовані технології забезпечують новий рівень економічності завдяки швидкості, точності та зменшенню людського фактора.

Витрати, асоційовані з традиційними методами:

1. Трудові ресурси

Традиційні методи потребують великої кількості маркшейдерів та асистентів для здійснення вимірювань. Для зйомки великого кар’єру необхідна команда з 3–5 осіб, що підвищує витрати на оплату праці. Внаслідок низького рівня автоматизації значна частина роботи виконується вручну, що подовжує тривалість виконання завдань і підвищує загальні витрати.

1. Тривалість виконання робіт

Огляд великої території може займати кілька днів. У процесі використання цього обладнання (теодоліти, тахеометри) виникає простій між вимірюваннями, що знижує ефективність використання ресурсів. Повторні вимірювання для верифікації або уточнення результатів також підвищують витрати часу та фінансів.

1. Помилки та їхня вартість

Людський фактор у традиційних методах викликає похибки, що можуть призвести до неналежного планування або помилок в оцінці обсягів робіт. Внаслідок цього підприємства можуть зазнати суттєвих фінансових збитків через неналежне використання ресурсів або порушення технологічного процесу.

1. Обмеження технологій

Традиційне обладнання, таке як оптичні тахеометри, має обмеження в точності та швидкості виконання. Це вимагає додаткових перевірок, що підвищує витрати.

Застосування сучасних методів призводить до:

1. Оптимізація трудових ресурсів

Використання дронів, автоматизованих теодолітів та лазерних сканерів значно зменшує потребу в людських ресурсах. Наприклад, територію може знімати одна особа, що управляє автоматизованим обладнанням.

1. Збільшення швидкості виконання завдань

Автоматизація сприяє виконанню завдань у десятки разів швидше. Наприклад, обліт кар'єру дронами триває 20–30 хвилин, тоді як традиційний обхід вимагав би кілька днів. Швидке виконання зменшує витрати на заробітну плату та скорочує час простою обладнання.

1. Точність та уникнення помилок

Автоматизовані системи, такі як GNSS у режимі RTK або лазерне сканування, гарантують високу точність даних. Це зменшує похибки, які в традиційних методах могли викликати перевитрати ресурсів або додаткові роботи. Програмне забезпечення автоматично обробляє дані, усуваючи потребу в ручних обчисленнях, які можуть бути помилковими.

1. Тривала окупність

Попри значні початкові витрати на обладнання (дрони, лазерні сканери, автоматизовані тахеометри), автоматизовані системи швидко компенсують витрати завдяки зниженню трудових затрат, скороченню часу виконання робіт та зменшенню кількості помилок.

1. Можливість спостереження та аналізу

Автоматизація забезпечує безперервний моніторинг стану кар'єру, оцінку обсягів видобутку та планування робіт з максимальною точністю. Це зменшує ризики простоїв і забезпечує ефективне використання ресурсів.

Переваги автоматизованих систем для економічності:

1. Оптимізація витрат на трудові ресурси

* скорочення чисельності необхідного персоналу;
* оптимізація робочого часу команди.

1. Зменшення ризику фінансових втрат

* висока точність даних сприяє запобіганню перевитратам матеріалів і помилкам у розрахунках.

1. Раціональне використання апаратури

* автоматизовані системи функціонують швидше та ефективніше, знижуючи час простою обладнання.

1. Швидка рентабельність

* інвестиції в автоматизацію забезпечують повернення завдяки суттєвій економії на операційних витратах.

# 2.5 Інтеграція з іншими системами

Інтеграція маркшейдерських даних з іншими системами управління є однією з основних переваг автоматизованих методів, що забезпечує формування єдиного інформаційного середовища для ухвалення рішень у гірничій промисловості. Сучасні технології, такі як дрони, лазерне сканування, GNSS та автоматизовані тахеометри, дозволяють автоматично передавати, обробляти та використовувати маркшейдерські дані в реальному часі. Традиційні методи, через свою обмеженість та відсутність цифрової інтеграції, суттєво поступаються сучасним підходам, що негативно позначається на ефективності гірничих робіт.

Особливості традиційного підходу:

1. Систематичний збір та передача інформації

У традиційних методах зібрані дані (координати, відстані, кути) фіксуються вручну у польових журналах. Після цього вони передаються до офісу для подальшої обробки.

Передача даних у програмне забезпечення, таке як AutoCAD, здійснюється вручну, що підвищує ймовірність помилок і уповільнює процес.

1. Недостатня оперативність

Дані збираються та обробляються поетапно, що унеможливлює використання інформації в реальному часі. Це викликає затримки між збором даних і ухваленням рішень на їх основі.

1. Обмежена інтеграція з іншими системами

Традиційні методи не забезпечують автоматичного інтегрування з геоінформаційними системами (ГІС), CAD-програмами або системами управління транспортом у кар’єрі. Це обмежує потенціал використання зібраних даних у всебічному аналізі.

1. Складність координації між відділами

Дані маркшейдерських зйомок подаються у формі звітів або креслень, що вимагає додаткового часу для інтеграції з іншими відділами, такими як планування, логістика або екологічний моніторинг.

Основні характеристики автоматизованої інтеграції:

1. Автоматизоване збирання та передача даних

Дані з дронів, лазерних сканерів або автоматизованих тахеометрів передаються в реальному часі до центральної бази даних через бездротові мережі (Wi-Fi, LTE, супутниковий зв'язок).

Програмне забезпечення, наприклад, Leica Infinity, Trimble Business Center або Pix4D, миттєво інтегрує ці дані з геоінформаційними системами (ГІС), такими як ArcGIS або QGIS.

1. Актуальний час для ухвалення рішень

Інтеграція з системами управління технікою забезпечує передачу актуальної інформації про рельєф безпосередньо операторам екскаваторів або самоскидів, що підвищує точність їх роботи.

Автоматизовані тахеометри здатні відстежувати зміни рельєфу та негайно передавати результати до систем управління для корекції планів.

1. Інтеграція з CAD та BIM-системами

Дані автоматизованих систем безперешкодно інтегруються в програми проектування, такі як AutoCAD, Civil 3D або Revit. Це сприяє оперативному створенню креслень, тривимірних моделей кар’єрів та аналізу обсягів видобутої руди.

1. Комплексний аналіз в єдиному інформаційному просторі

Сучасні системи забезпечують інтеграцію маркшейдерських даних з іншими інформаційними типами: моніторинг транспорту, екологічний стан, дані видобутку та фінансові показники.

Це забезпечує комплексний аналіз для оптимізації функціонування підприємства.

Порівняльна таблиця інтеграції традиційних та автоматизованих методів наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

**Порівняння інтеграції традиційних та автоматизованих методів**

| **Параметр** | **Традиційні методи** | **Автоматизовані методи** |
| --- | --- | --- |
| **Збір і передача даних** | Ручний, повільний | Автоматичний, у реальному часі |
| **Точність передачі** | Залежить від людського фактора | Висока, дані оцифровані |
| **Інтеграція з ГІС** | Обмежена | Безшовна, із автоматичним оновленням |
| **Підключення до**  **CAD-систем** | Вимагає ручного переносу даних | Дані одразу готові для використання |
| **Реальний час** | Немає | Є, що дозволяє швидке прийняття рішень |
| **Координація між підрозділами** | Ускладнена | Максимально спрощена завдяки єдиній базі |

Переваги автоматизованої інтеграції:

1. Ефективність виконання завдань

Автоматизована передача даних у реальному часі усуває затримки між виконанням вимірювань та застосуванням інформації у виробничих процесах.

1. Точність та прозорість

Автоматично зібрані цифрові дані зменшують ймовірність помилок, пов'язаних із ручним введенням.

1. Єдине інформаційне середовище

Інтеграція з іншими системами забезпечує доступ усіх підрозділів до актуальної інформації, що спрощує координацію діяльності та ухвалення рішень.

1. Прогностична здатність

Дані, інтегровані в аналітичні системи, дозволяють не лише аналізувати актуальну ситуацію, але й прогнозувати потенційні сценарії розвитку подій, такі як зміни рельєфу або оптимальні маршрути для транспорту.

Інтеграція з іншими системами є одним із найзначніших досягнень автоматизованих методів маркшейдерського забезпечення. Завдяки впровадженню сучасних технологій, підприємства здобувають можливість функціонувати в єдиному цифровому середовищі, що гарантує високу точність, швидкість і ефективність процесів. Традиційні методи, через свою обмеженість, не можуть забезпечити необхідний рівень синхронізації, що робить автоматизацію невід'ємною складовою сучасного гірничого виробництва.

# РОЗДІЛ 3 ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

# 3.1 Геоінформаційні системи (ГІС): переваги та програмне забезпечення

Геоінформаційні системи (ГІС) є основним інструментом для обробки, аналізу та візуалізації просторових даних. У контексті маркшейдерського забезпечення гірничих робіт, особливо при відкритій розробці залізної руди, ГІС відіграють ключову роль у формуванні високоточних цифрових моделей кар'єру, управлінні гірничими операціями та моніторингу змін на об'єкті.

ГІС забезпечують інтеграцію різних типів геопросторової інформації (наприклад, топографічних, геологічних, геодезичних даних) в єдиній інтерактивній платформі. Це дозволяє користувачам аналізувати стан кар'єри в реальному часі, ухвалювати обґрунтовані рішення та ефективно планувати діяльність.

Переваги застосування ГІС у маркшейдерії

* точність і надійність даних (ГІС забезпечують обробку великих обсягів геопросторових даних з мінімальною похибкою. Зокрема, інтеграція лазерного сканування та даних, отриманих за допомогою дронів, дозволяє створювати 3D-моделі кар’єру з деталізацією до сантиметрового рівня);
* можливість інтеграції з іншими технологіями (ГІС безперешкодно інтегруються з лазерними сканерами, супутниковими системами (GPS/GNSS), дронами та спеціалізованим програмним забезпеченням для моделювання гірничих робіт). Це формує єдиний інформаційний простір для управління всіма аспектами розробки родовища.
* оперативний моніторинг та аналіз (з використанням ГІС, маркшейдери здатні швидко реагувати на зміни у стані кар’єру, наприклад, виявляти обвали, зміни бортів або зсуви ґрунту. Це сприяє зменшенню ризиків аварій та підвищенню безпеки робіт);
* просторова візуалізація (завдяки ГІС можливо створювати детальні карти, 3D-моделі, профілі та розрізи кар’єру, що сприяє кращому розумінню просторових характеристик об’єкта всіма учасниками процесу – від інженерів до керівників підприємств);
* ефективне управління ресурсами (ГІС оптимізують використання ресурсів, таких як транспорт, обладнання та персонал, шляхом аналізу даних про їх місцезнаходження та стан у реальному часі);
* автоматизація процесів (сучасні геоінформаційні системи здатні здійснювати автоматичне оновлення моделей, обчислення обсягів породи та інші рутинні завдання, що суттєво знижує навантаження на маркшейдерську службу);
* тривале зберігання та аналіз даних (ГІС забезпечують збереження історичних даних про зміни в кар'єрі, що є суттєвим для планування майбутніх робіт та оцінки довгострокових ризиків).

Складнощі впровадження ГІС:

1. Значна вартість апаратного та програмного забезпечення

Інвестиції в ГІС-системи та навчання персоналу можуть бути суттєвими, що ускладнює їх впровадження для малих підприємств.

1. Складність інтеграції

Інтеграція ГІС з існуючою інфраструктурою підприємства вимагає технічної експертизи та часу.

1. Залежність від технологічної інфраструктури

Для функціонування ГІС необхідні сучасні комп'ютери, сервери та інше обладнання, яке може бути недоступним для деяких підприємств.

# 3.1.1 Програмне забезпечення для геоінформаційних систем

Сьогодні існує різноманітне програмне забезпечення, що застосовується в гірничодобувній промисловості. Нижче наведені найбільш поширені рішення:

1. ArcGIS (Esri) – це потужна геоінформаційна система, що забезпечує обробку великих обсягів даних, а також можливість створення тривимірних карт і інтерактивних моделей. Ключові переваги: інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, широкий спектр аналітичних інструментів, інтеграція з хмарними сервісами для зберігання даних. Застосовується для аналізу геопросторових даних на всіх етапах розробки родовищ;
2. AutoCAD Civil 3D (Autodesk) – інструмент, спеціально розроблений для інженерного проектування та моделювання місцевості. Основні функції: моделювання кар'єри, аналіз ухилів, проектування транспортної інфраструктури. Перевага: легкість у використанні для генерації високоточних цифрових моделей;
3. Micromine – це програмний продукт, розроблений для гірничодобувних компаній. Характеристики: розробка моделей родовищ, планування видобутку, моделювання розкривних робіт. Різниця: спеціалізація у обробці геологічних та маркшейдерських даних;
4. Surfer (Golden Software) – програма для створення тривимірних моделей та топографічних карт. Переваги: висока точність моделювання, можливість аналізу рельєфу та розрахунку об'ємів породи;
5. MineSight (Hexagon Mining) – інтегроване рішення для проектування та моніторингу гірничих робіт. Характеристики: підтримка 3D- та 4D-моделювання, розробка планів видобутку, інтеграція з маркшейдерськими пристроями. Застосовується для комплексного управління розробкою родовищ;
6. Maptek Vulcan – програмне забезпечення для моделювання кар'єрів і шахт. Переваги: підтримка геологічного аналізу, розробка цифрових моделей та планів експлуатації;
7. QGIS (Quantum GIS) – безкоштовне програмне забезпечення з відкритим кодом, що надає потужні можливості для обробки геопросторових даних. Ключові переваги: доступність, активна підтримка спільноти, можливість адаптації під специфічні потреби підприємства.

# 3.1.2 Приклади впровадження ГІС у гірничодобувній галузі

Південний гірничо-збагачувальний комбінат (Україна). Використання ГІС для моніторингу стану кар'єру дозволило значно скоротити час, необхідний для обробки геодезичних даних. Завдяки інтеграції з дронами, підприємство генерує детальні 3D-моделі та швидко реагує на зміни рельєфу.

Мінеральні родовища в Західній Австралії. Використання MineSight для проектування відкритих кар'єрів забезпечує оптимальне використання обладнання та максимальне збільшення видобутку (рис 3.1).

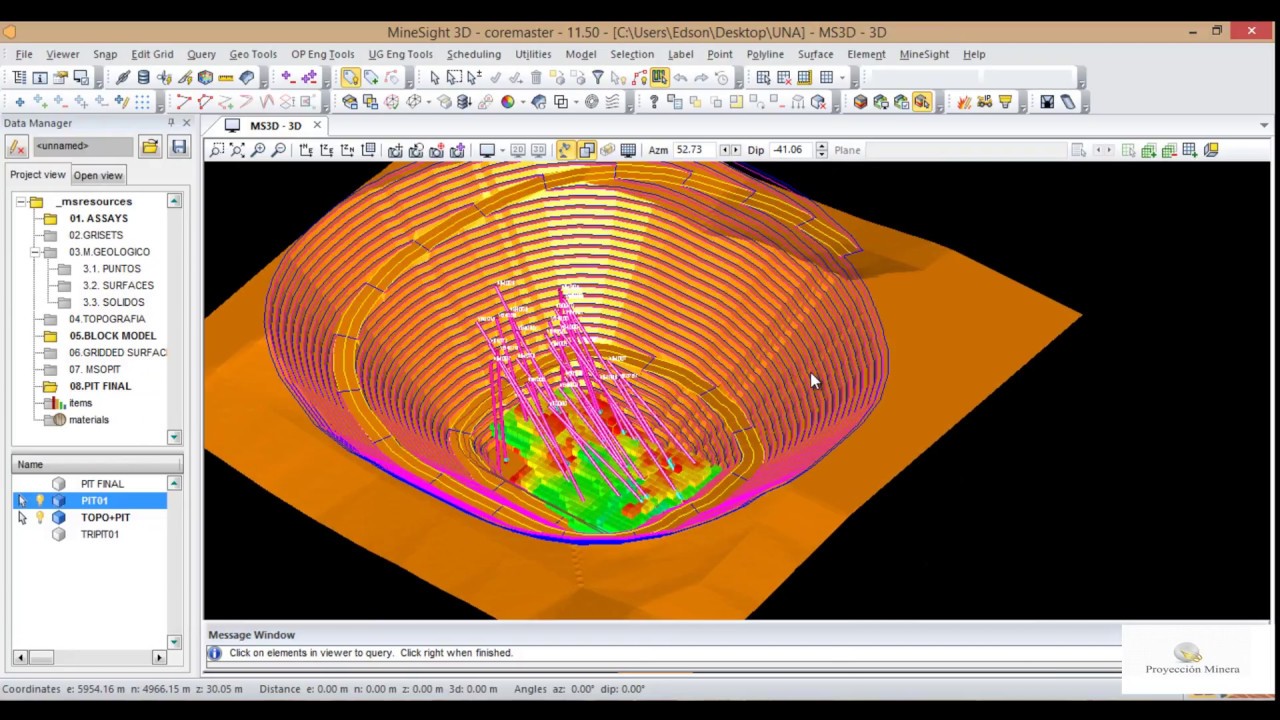


Рис. 3.1 Програма MineSight

# 3.2 Лазерне сканування: принципи функціонування та специфіка використання

Лазерне сканування є сучасною технологією дистанційного вимірювання, що забезпечує високу точність у створенні тривимірних моделей поверхонь і об'єктів. Ця технологія базується на принципі вимірювання часу, необхідного для проходження лазерного променя від джерела до об'єкта і назад до приймача.

Ключові етапи функціонування лазерного сканера:

* генерація лазерного променя – лазерний сканер випромінює вузький світловий промінь, який націлюється на об'єкт;
* вимірювання часу або фази сигналу – лазерний пристрій визначає час проходження сигналу («час польоту») або зсув фази між випроміненим і прийнятим сигналом. Цей параметр дозволяє визначити відстань до кожної точки об'єкта;
* рух лазерного променя – дзеркала в середині сканера обертають промінь в різних напрямках, що дозволяє зібрати дані з усієї видимої області;
* збір даних у форматі «хмари точок» – кожна точка, зафіксована сканером, має координати X, Y, Z, які разом формують так звану «хмару точок».
* постобробка даних полягає в обробці зібраних даних за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для генерації тривимірних моделей, розрізів і профілів.

Види лазерного сканування:

1. Наземне лазерне сканування (наземне лазерне сканування, TLS)

Використовується для ретельного сканування локальних об'єктів за допомогою стаціонарних або портативних сканерів. TLS зазвичай використовується в геодезії для вимірювання геометрії кар'єрів, запасів корисних копалин і рельєфу місцевості.

1. Мобільне лазерне сканування (мобільне лазерне сканування, MLS)

Здійснюється за допомогою сканерів, розташованих на мобільних платформах (автомобілях, дронах). MLS є придатним для обширних територій, таких як сканування протяжних трас або великих кар'єрів.

1. Дистанційне лазерне сканування (Aerial Laser Scanning, ALS)

Виконується за допомогою сканерів, встановлених на повітряних суднах (літаках, вертольотах, дронах). ALS застосовується для генерації детальних топографічних карт обширних територій (рис. 3.2).

Изображение выглядит как карта, графический дизайн, искусство

Автоматически созданное описание

Рис. 3.2. Дистанційне лазерне сканування

# 3.2.1 Характеристика застосування лазерного сканування в гірничодобувній промисловості

Лазерне сканування забезпечує швидку оцінку змін геометрії кар’єру, включаючи моніторинг уклонів бортів, виявлення тріщин та потенційних зон обвалу. Це підвищує безпеку гірничих робіт.

Завдяки даним сканування, маркшейдери здатні точно визначити обсяги видобутої породи, порівнюючи 3D-моделі до і після виконання робіт.

Завдяки високій точності даних, отриманих зі сканера, можливо створювати детальні 3D-моделі кар’єру, які використовуються для проектування робіт, розробки планів та аналізу ефективності видобутку.

Дані лазерного сканування безперешкодно інтегруються з геоінформаційними системами (ГІС) або CAD-програмами, такими як AutoCAD, Micromine, Maptek Vulcan. Це сприяє інтеграції геометричної інформації з іншими категоріями даних для всебічного аналізу.

Регулярне сканування схилів кар’єру дозволяє виявляти зміни, що можуть свідчити про потенційні зсуви ґрунту або обвали.

Сканери застосовуються для вимірювання обсягів матеріалів, що зберігаються на відкритих складах. Це забезпечує точний облік і зменшує втрати.

# 3.2.2 Переваги та недоліки лазерного сканування

Серед переваг лазерного сканування варто зазначити:

1. Високу точність. Сучасні сканери забезпечують точність вимірювань до кількох міліметрів, що є вкрай важливим у маркшейдерських роботах.
2. Темп зйомки. Лазерні сканери можуть фіксувати тисячі точок за секунду, що забезпечує швидке отримання даних про великі об'єкти.
3. Віддалену робота. Сканери забезпечують можливість здійснення вимірювань на безпечній відстані, що зменшує ризик для працівників у небезпечних зонах.
4. Універсальність. Лазерне сканування може бути використане для вимірювання як великих територій (кар’єри, дороги), так і локальних об'єктів (уклонів, схилів).
5. Збереження даних. Зібрані дані можуть бути архівовані та використані для тривалого моніторингу стану об'єкта.

Серед недоліків впровадження лазерного сканування можна виділити:

1. Велику ціну обладнання. Професійні лазерні сканери є витратними, що може стати перешкодою для малих підприємств.
2. Необхідність спеціалізованої підготовки кадрів. Операції з лазерними сканерами та програмним забезпеченням потребують відповідної кваліфікації.
3. Залежність від екологічних умов. Фактори, такі як пил, дощ або яскраве освітлення, можуть впливати на якість отриманих даних.

# 3.2.3 Приклади реалізації лазерного сканування

Рудник Криворізького залізорудного басейну – застосування наземних лазерних сканерів зменшило тривалість вимірювань і суттєво підвищило точність моніторингу стану кар’єру.

Канадські золоторудні шахти використовують мобільні лазерні сканери для оцінки обсягів видобутої руди та моніторингу складів, що зменшує втрати сировини під час транспортування.

Австралійські залізорудні кар'єри регулярно моделюються топографічно за допомогою авіаційного сканування дронів для оцінки обсягів видобутку.

# 3.3 Безпілотні літальні апарати

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), відомі як дрони, в останні роки стали одним із найефективніших інструментів у гірничій промисловості. Їх застосування в маркшейдерії, зокрема при відкритій розробці залізної руди, значно спрощує виконання завдань, пов'язаних із вимірюванням, моніторингом та моделюванням кар'єрів. Дрони надають можливості, які раніше були доступні лише через тривалий і витратний процес наземної зйомки (рис. 3.3).

Однією з основних переваг дронів є швидкість збору даних. Те, що наземним методам могло займати дні або навіть тижні, дрон виконує за кілька хвилин. Наприклад, обліт великого кар'єру за допомогою дрона може тривати від 10 до 30 хвилин. Точність вимірювань залишається на найвищому рівні завдяки сучасним камерам і сенсорам, таким як LiDAR, а також інтеграції з GPS/GNSS. В результаті отримуються детальні тривимірні моделі з точністю до кількох сантиметрів.

Дрони суттєво зменшують ризики для працівників, оскільки забезпечують дистанційну роботу. Необхідність відправляти працівників у небезпечні зони, такі як круті схили або території з підвищеним ризиком обвалу, відсутня. Все, що необхідно, – це активувати дрон, і ви отримуєте де-

Изображение выглядит как земля, на открытом воздухе, песок, пляж

Автоматически созданное описание

Рис. 3.3 БПЛА

тальну інформацію про стан кар'єру, не наражаючи людей на додаткову небезпеку.

Дрони забезпечують можливість створення високоточних 3D-моделей кар'єрів, ортофотопланів та цифрових моделей рельєфу (DEM). Ці дані є вкрай корисними для аналізу актуального стану кар'єру, планування робіт або розрахунку обсягів видобутої породи. Крім того, дрони можуть бути застосовані для оперативного моніторингу в реальному часі. Камери на борту передають зображення на пульт оператора, що дозволяє оперативно оцінювати ситуацію та ухвалювати обґрунтовані рішення.

Ще одна значна перевага дронів – їхня економічність. У порівнянні з традиційними методами зйомки або використанням вертольотів, дрони є значно економічнішими. Вони зменшують витрати на трудові ресурси, обладнання та час, раніше витрачений на виконання завдань.

Дрони виконують численні завдання у маркшейдерському забезпеченні. Наприклад, вони є незамінними для спостереження за станом кар'єру. Систематичне моніторинг рельєфу сприяє своєчасному виявленню ерозії, тріщин або інших змін, що можуть вплинути на стабільність бортів. Вони також забезпечують швидку та точну оцінку обсягів видобутої руди, а 3D-моделі сприяють оптимізації планування транспортних маршрутів і розміщення техніки.

Дрони також сприяють моніторингу складів корисних копалин. Застосування їх дозволяє здійснювати інвентаризацію складів та знижувати втрати ресурсів. У випадку аварій чи обвалів дрони є оптимальним засобом для розслідування, оскільки забезпечують оперативний доступ до інформації, яку важко здобути іншими способами.

# 3.3.1 Види дронів у маркшейдерському забезпеченні

Дрони, або безпілотні літальні апарати (БПЛА), давно вийшли за межі використання виключно для аматорської зйомки. У маркшейдерському забезпеченні гірничих робіт, зокрема при відкритій розробці залізної руди, вони виконують ключову роль завдяки своїй універсальності. Вибір конкретного типу дрона визначається завданнями, які необхідно виконати: створення точних 3D-моделей, контроль обсягів видобутку, моніторинг стабільності схилів або інвентаризація складів.

Розглянемо три основні типи дронів, що найчастіше застосовуються в маркшейдерії: мультироторні дрони, фіксованокрилі дрони та гібридні моделі.

# 3.3.1.1 Мультироторні дрони

Мультироторні дрони є найбільш поширеним типом безпілотних літальних апаратів, що застосовуються в різних сферах, зокрема в гірничій промисловості. Вони оснащені кількома пропелерами, що забезпечують їм можливість зависати в повітрі, виконувати точні маневри та облітати об'єкти на невеликій висоті. Зазвичай це квадрокоптери (чотири ротори), хоча існують також більш складні моделі – гексакоптери (шість роторів) та октокоптери (вісім роторів) (рис. 3.4).

Изображение выглядит как игрушка, дрон, сельскохозяйственная машина

Автоматически созданное описание

Рис. 3.4 Гексакоптер

Переваги мультироторних безпілотників:

* маневреність – ці дрони здатні зависати над певною точкою, що забезпечує отримання високоточних зображень або проведення сканування локальних об'єктів, таких як уклони схилів чи місця обвалів;
* компактність і зручність використання – ці мультироторні дрони, завдяки своїм малим розмірам, легко транспортуються, а їх запуск і управління не вимагають складного обладнання;
* мультироторні дрони, завдяки своїй стабільності під час польоту, забезпечують створення детальних ортофотопланів і 3D-моделей.

Області використання мультироторів у маркшейдерії:

* моніторинг ухилів і схилів кар’єру;
* розробка точних моделей родовищ корисних копалин;
* аналіз локальних змін рельєфу, наприклад, після вибухових робіт.

Проте мультироторні дрони мають обмежений час польоту – зазвичай до 30-40 хвилин, що може бути недоліком при виконанні завдань на великих територіях.

# 3.3.1.2 Фіксованокрилі безпілотники

Фіксованокрилі дрони зовні нагадують малі літаки. Вони оснащені стаціонарними крилами, які генерують підйомну силу завдяки аеродинамічним властивостям. Ці фіксованокрилі дрони можуть здійснювати дальні польоти з незначними витратами енергії (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Фіксованокрилий БПЛА SenseFly eBee

Основні переваги дронів з фіксованим крилом:

* дальність польоту – ці дрони здатні охоплювати великі території за один політ, що є особливо корисним для зйомки обширних кар'єрів або довгих транспортних маршрутів;
* тривалість роботи – час польоту фіксованокрилих дронів часто перевищує одну годину, що сприяє зменшенню кількості запусків;
* швидкість зйомки – завдяки аеродинамічній конструкції ці дрони здійснюють польоти зі швидкістю до 70-90 км/год, що суттєво оптимізує процес збору даних.

Області використання фіксованокрилих дронів:

* топографічна інвентаризація значних кар’єрів;
* створення детальних цифрових моделей рельєфу (DEM) для територіального аналізу;
* моніторинг довгих об'єктів, таких як дороги, інфраструктура або межі кар'єру.

Головним недоліком фіксованокрилих дронів є ускладнене маневрування. Вони не можуть залишатися в одній точці, що знижує їхню ефективність для локальних завдань. Для запуску також необхідний спеціалізований майданчик або катапульта.

# 3.3.1.3 Гібридні дрони

Гібридні дрони інтегрують оптимальні характеристики мультироторних і фіксованокрилих дронів. Вони мають конструкцію, що дозволяє виконувати вертикальний зліт і посадку (як у мультироторів), а під час польоту використовувати крила для забезпечення аеродинамічної підйомної сили (як у фіксованокрилих моделей).

Основні переваги гібридних безпілотників:

* універсальність – ці дрони здатні виконувати завдання на великих територіях, а також забезпечувати точну зйомку в локальних зонах;
* енергетична ефективність – завдяки застосуванню крил у горизонтальному польоті, гібридні дрони споживають менше енергії, ніж мультироторні моделі;
* вертикальний зліт і посадка є особливо корисними для діяльності в умовах обмеженого простору, де відсутня можливість використання злітної смуги.

Область використання гібридних дронів:

* для топографічної зйомки кар'єру та моніторингу рельєфу;
* при розробці детальних карт і моделей складних об'єктів;
* для завдань, що вимагають дальності польоту з елементами точного позиціонування.

Гібридні моделі залишаються відносно новими на ринку, тому їхня вартість може перевищувати ціну традиційних типів дронів. Проте вони поступово займають свою позицію в гірничодобувній індустрії завдяки своїй універсальності.

# 3.3.1.4 Підбір дрона для геодезичних робіт

Кожен тип дронів має свої переваги, і вибір визначається конкретними завданнями. Для детального дослідження локальної зони, такої як склади породи чи місця обвалів, оптимально використовувати мультироторні дрони. Для великих територій, де необхідні швидкість і тривалість польоту, найкращим вибором є фіксованокрилі моделі. Гібридні дрони стануть універсальним рішенням, коли роботи вимагають поєднання маневреності та значної дальності.

Підбір також залежить від бюджету, наявності обладнання, рівня кваліфікації персоналу. Попри різноманіття моделей, усі ці дрони підвищують ефективність маркшейдерських робіт і відкривають нові можливості для гірничої індустрії.

# 3.3.2 Програмне забезпечення для управління дронами в маркшейдерських роботах

Використання дронів у гірничодобувній промисловості досягає оптимальної ефективності лише тоді, коли зібрані дані точно обробляються та візуалізуються. Для цього потрібне спеціалізоване програмне забезпечення, яке автоматизує процеси обробки фотограмметрії, створення 3D-моделей, ортофотопланів та аналізу даних для планування гірничих робіт. У сучасній маркшейдерії найбільш популярними є програми Pix4D, DroneDeploy, Agisoft Metashape та Trimble Stratus. Кожен з них має свої переваги та особливості, які роблять їх незамінними у роботі з безпілотниками.

Pix4D – одна з найпотужніших і найпопулярніших платформ для обробки даних, зібраних за допомогою дронів. Вона спеціалізується на фотограмметрії та створенні цифрових моделей поверхні. Ця програма забезпечує геоприв'язку, що дозволяє інтегрувати отримані результати з іншими геоінформаційними системами (рис. 3.6).

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, карта, Графическое программное обеспечение

Автоматически созданное описание

Рис. 3.6 Цифрова модель створена в програмному середовищі Pix4D

Характеристики Pix4D:

* фотограмметрія (програма автоматично обробляє знімки, отримані з дронів, перетворюючи їх у детальні 2D-карти та 3D-моделі).
* ортофотоплани високої роздільної здатності (Pix4D дозволяє генерувати ортофотоплани з геоприв’язкою, що ідеально підходять для вимірювання відстаней і площ);
* цифрові моделі рельєфу (DEM) (програма створює цифрові моделі поверхні та висотні карти, що є надзвичайно корисними для аналізу рельєфу кар'єру);
* гнучкість обробки (Pix4D надає можливість як локальної обробки даних на вашому комп'ютері, так і роботи в хмарному середовищі, що забезпечує обробку великих обсягів даних навіть за обмежених ресурсів).

Pix4D є найкращим вибором для генерації тривимірних моделей кар’єрів, моніторингу змін рельєфу та розрахунку обсягів видобутої породи. Завдяки своїй точності, програма забезпечує результати, які безперешкодно інтегруються з CAD-системами для подальшого аналізу.

DroneDeploy – це комплексна платформа для управління польотами дронів та обробки даних. Головною її перевагою є легкість у використанні та можливість автоматизації численних процесів, що робить її ідеальною для користувачів з різним рівнем підготовки.

Характеристики DroneDeploy:

* планування польотів (програма дозволяє формувати плани польотів дронів, враховуючи висоту, радіус обльоту та зони інтересу);
* швидка обробка (зібрані дані обробляються оперативно та автоматизовано, що забезпечує отримання готових карт і моделей без значних часових витрат);
* хмарна платформа (усі дані зберігаються в хмарному середовищі, що забезпечує доступ до них з будь-якого пристрою);
* інтеграція з іншими програмами (DroneDeploy підтримує інтеграцію з ГІС та CAD-системами, такими як AutoCAD, що розширює можливості аналізу).

DroneDeploy є оптимальним рішенням для моніторингу стану кар'єру, оцінки обсягів видобутої руди та картографування великих територій. Її інтуїтивно зрозумілий інтерфейс забезпечує швидке виконання завдань, навіть без значних технічних знань.

Agisoft Metashape – спеціалізоване програмне забезпечення для обробки фотограмметричних зображень та створення тривимірних моделей. Вона славиться своєю високою точністю та адаптивністю в налаштуваннях обробки.

Характеристики Agisoft Metashape:

* підтримка різних типів зображень (програма обробляє дані як з RGB-камер, так і з мультиспектральних та термографічних сенсорів);
* точна геоприв'язка (Agisoft забезпечує інтеграцію з GNSS-даними, що дозволяє формувати тривимірні моделі з точними координатами);
* інструменти аналізу (програма дозволяє генерувати DEM, розраховувати обсяги та порівнювати різні часові зрізи для оцінки змін рельєфу);
* сумісність з іншими системами (дані, отримані за допомогою Metashape, легко експортуються до інших програм, таких як AutoCAD або ArcGIS).

Agisoft Metashape – оптимальний інструмент для завдань, що вимагають високого рівня деталізації. Наприклад, вона застосовується для аналізу ухилів схилів, оцінки обсягів запасів корисних копалин або створення цифрових моделей кар'єрів.

Trimble Stratus – це спеціалізоване програмне забезпечення, розроблене для гірничодобувної промисловості. Це дозволяє не лише обробляти дані, а й застосовувати їх для стратегічного планування та управління кар'єрою.

Характеристики Trimble Stratus:

* інтерактивний аналіз (дозволяє візуалізувати зміни рельєфу в реальному часі);
* визначення об'ємів породи (точні алгоритми розрахунку сприяють оцінці обсягів розкривних робіт або видобутої руди);
* хмарна платформа забезпечує доступ до даних з будь-якого пристрою, що сприяє спільній роботі.

Trimble Stratus – це комплексне рішення для аналізу та управління процесами робочих процесів у кар'єрах. Придатний для генерації звітів, що поєднують візуалізацію та точні обчислення.

# 3.3.3 Вибір програмного забезпечення дрона

Кожна програма має свої переваги, і вибір конкретного інструменту визначається специфікою діяльності. Pix4D підходить для складних завдань фотограмметрії, DroneDeploy призначений для швидкої обробки та планування польотів, Agisoft Metashape ідеально підходить для завдань з високою деталізацією, а Trimble Stratus призначений для інтерактивного аналізу та довгострокового планування.

Інтеграція цих програм з іншими системами, такими як AutoCAD, ArcGIS або MineSight (рис. 3.7), робить їх універсальними рішеннями для гірничодобувної промисловості. Завдяки їхній підтримці маркшейдери здатні більш ефективно виконувати свої обов'язки, підвищуючи точність і продуктивність діяльності.

Изображение выглядит как снимок экрана, Мультимедийное программное обеспечение, текст, программное обеспечение

Автоматически созданное описание

Рис. 3.7 Приклад інтеграції AutoCAD та DroneDeploy

Незважаючи на численні переваги дронів, їхнє застосування супроводжується певними труднощами. Однією з ключових проблем є регулювання авіаційних польотів – у певних регіонах вимагається отримання дозволів на експлуатацію дронів. Крім того, дрони чутливі до метеорологічних умов: сильний вітер, дощ або сніг можуть значно ускладнити польоти. Фактор вартості є також суттєвим: якісні дрони з лазерними сенсорами або камерами високої роздільної здатності є дорогими, і для їх експлуатації необхідні кваліфіковані оператори.

# 3.4 Супутникові системи (GPS/GNSS)

Супутникові системи, такі як GPS і GNSS, давно інтегровані в наше життя, і їхнє використання перевищує навігацію автомобілями чи пошук адрес. У гірничій справі ці технології відкривають нові можливості, дозволяючи маркшейдерам виконувати свою роботу швидше, точніше та безпечніше. У відкритій розробці залізної руди, де кожен метр має значення для планування, обліку та моніторингу, GPS/GNSS стали істотним досягненням.

Принцип функціонування супутникових систем є досить простим: існують супутники, що обертаються навколо Землі, та наземний приймач, який «перехоплює» їхній сигнал. Вимірюючи інтервал часу, за який сигнал досягає приймача з супутника, система здатна з високою точністю визначити координати місця. Це виглядає як магія, але базується на надзвичайно точних обчисленнях. У гірничій справі, завдяки цьому підходу, ми досягаємо сантиметрової точності на площах, що можуть охоплювати сотні гектарів.

Яке це має значення для маркшейдерів? По-перше, значне спрощення польових робіт. Раніше для проведення зйомки в кар’єрі необхідно було створювати геодезичні мережі, використовувати складне обладнання та витрачати значну кількість часу. Тепер достатньо розмістити GNSS-приймач у визначеній точці, і координатні дані будуть отримані за кілька секунд. Це особливо зручно в відкритих кар'єрах, де щодня змінюється рельєф, і необхідна оперативна інформація про ці зміни.

Крім швидкості, GPS/GNSS дозволяє працювати в важкодоступних або небезпечних місцях. Наприклад, маркшейдеру більше не потрібно ставити під загрозу своє життя, входячи на нестабільні схили або борти кар'єру. Розмістивши приймач на віддаленій безпечній локації, можна без зусиль отримати всі необхідні дані. Це суттєво зменшує ризики, пов'язані з діяльністю в зонах обвалів або зсувів.

Ще однією значною перевагою є контроль над технікою. Сучасні екскаватори, самоскиди та бурові установки оснащуються GPS-приймачами, що забезпечують моніторинг їхнього місцезнаходження в режимі реального часу. Наприклад, ви спостерігаєте за рухом самоскидів, оцінюєте їхню ефективність у транспортуванні породи та виявляєте наявність простоїв. Це не лише сприяє підвищенню ефективності, а й зберігає ресурси, такі як паливо.

Ключовим аспектом кар'єрної діяльності є контроль обсягів видобутої руди. Супутникові системи автоматизують цей процес: порівнюючи моделі рельєфу до і після видобутку, можна з високою точністю визначити обсяг переміщеної або видобутої породи. Така точність знижує ризик помилок і впорядковує облік мінеральних ресурсів.

GPS/GNSS є незамінними для моніторингу стану кар'єру. Наприклад, завдяки систематичному збору координат у критичних точках можливо відстежувати навіть незначні зміщення ґрунту. Це сприяє своєчасному виявленню небезпечних зон та запобіганню аваріям.

Ще одна перевага – інтеграція супутникових даних із сучасним програмним забезпеченням. В даний час GPS/GNSS інтегруються з геоінформаційними системами (ГІС), безпілотними літальними апаратами та лазерним скануванням. Усе це сприяє інтеграції інформації з різних джерел у єдину цифрову модель кар'єри. Уявіть: у вас є 3D-карта, що відображає актуальний стан кар'єру, переміщення техніки, обсяги видобутку та потенційні зони ризику.

Незважаючи на всі переваги, слід також зазначити виклики. Наприклад, якість сигналу може становити проблему. У глибоких кар'єрах або за несприятливих погодних умов сигнал від супутників може ослаблюватися, що негативно позначається на точності вимірювань. Супутникове обладнання є дорогим, і для його ефективного використання необхідні кваліфіковані фахівці.

Однак навіть з урахуванням цих нюансів супутникові системи трансформували правила гри в гірничій індустрії. Вони перетворилися не лише на зручний інструмент, а на справжній необхідний елемент для маркшейдерів. GPS/GNSS сприяють економії часу, підвищують точність, зменшують ризики та відкривають нові можливості для управління кар'єрою. У майбутньому, з розвитком технологій, їхнє використання лише розшириться, підвищуючи ефективність та безпеку гірничих робіт.

Автоматизація маркшейдерського забезпечення за допомогою GPS/GNSS знижує вплив людського фактора, підвищує точність вимірювань та суттєво прискорює їх виконання. Ці системи фактично замінюють традиційні методи, що вимагали створення наземних геодезичних мереж та виконання складних обчислень.

Сучасні GNSS-приймачі, у поєднанні з програмним забезпеченням, можуть в режимі реального часу забезпечувати дані про місцезнаходження об'єктів з точністю до кількох сантиметрів. Ця функція є критично важливою для маркшейдерів, які здійснюють діяльність у великих кар’єрах, де геометрія постійно змінюється внаслідок видобутку руди.

# 3.4.1 Програмне забезпечення для взаємодії з GPS/GNSS

Для оптимального використання можливостей супутникових систем необхідне сучасне програмне забезпечення, яке забезпечує обробку зібраних даних, їх аналіз та створення 3D-моделей кар’єрів. Ось кілька найпоширеніших програм, що застосовуються в гірничій індустрії:

Trimble Business Center є провідною програмою на ринку інструментів для аналізу даних GNSS. Вона надає можливість маркшейдерам і геодезистам оперативно обробляти дані, генерувати 3D-моделі та здійснювати розрахунки об'ємів породи (рис. 3.8).

Характеристики:

* точна обробка GNSS-вимірювань у режимах RTK та PPK;
* розробка детальних цифрових моделей поверхні;
* інтеграція з CAD-системами для генерації планів і звітів.

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, диаграмма, линия

Автоматически созданное описание

Рис. 3.8 Програма Trimble Business Center

Leica Infinity – розроблена компанією Leica Geosystems, ця програма забезпечує обробку даних GNSS, тахеометрів та лазерних сканерів.

Переваги:

* висока точність обробки даних з геоприв'язкою;
* підтримка багатозонального аналізу кар'єри;
* інтуїтивно зрозумілий інтерфейс.

ArcGIS Pro – це геоінформаційна система, що сприяє обробці великих обсягів геопросторових даних. ArcGIS є універсальним інструментом для картографії, моделювання та просторового аналізу.

Переваги:

* підтримка інтеграції з GNSS-ресиверами;
* розробка карт і тривимірних візуалізацій кар'єрів;
* розширені можливості аналізу геопросторових трансформацій.

Surfer – це програмне забезпечення, яке спеціалізується на створенні цифрових моделей рельєфу (DEM) та аналізі змін рельєфу (рис. 3.9)

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, программное обеспечение, Графическое программное обеспечение

Автоматически созданное описание

Рис. 3.9 Приклад роботи в програмному середовищі Surfer

Переваги:

* точний аналіз змін у рельєфі після вибухових робіт або видобутку;
* вимірювання об'ємів породи;
* інтуїтивно зрозумілий інтерфейс.

# 3.4.2 Інтеграція GNSS з автоматизованими системами

Технології GPS/GNSS добре функціонують при інтеграції з іншими засобами автоматизації. Наприклад:

* супутникові системи дозволяють прив'язувати зображення та дані, отримані з дронів, до реальних координат, забезпечуючи точність тривимірних моделей.
* з лазерними сканерами: GNSS сприяють інтеграції даних лазерного сканування для створення моделей рельєфу або родовищ корисних копалин.
* у транспортних системах: GPS-приймачі на гірничій техніці сприяють моніторингу переміщення транспорту, забезпечуючи безперервність робочого процесу.

# 3.4.3 Практичні приклади застосування GPS/GNSS

Моніторинг стабільності схилів. Супутникові системи забезпечують регулярний моніторинг змін у рельєфі схилів кар'єру, виявляючи навіть незначні зсуви, що можуть спричинити обвал.

Оцінка обсягів видобутку. Порівнюючи цифрові моделі рельєфу до і після видобутку, технології GNSS забезпечують точний розрахунок обсягів видобутої руди.

Планування діяльності в кар'єрі. Інтеграція GPS-даних з програмами моделювання сприяє формуванню оптимальних планів транспортування породи, розміщення техніки та маршрутизації.

Моніторинг безпеки виконання робіт. Систематичний моніторинг рельєфу кар'єру за допомогою GNSS-приймачів сприяє своєчасному виявленню небезпечних зон.

Супутникові системи GPS/GNSS створили нові можливості для маркшейдерського забезпечення в гірничій промисловості. Їх використання у відкритому видобутку залізної руди сприяє високій точності вимірювань, швидкому збору та аналізу даних, а також автоматизації рутинних процесів. У інтеграції з сучасним програмним забезпеченням та іншими автоматизованими системами GNSS слугують основою ефективного управління кар’єрами, забезпечуючи їх стабільну та безпечну експлуатацію.

# 3.5 Інтеграція робототехніки та автоматизованих тахеометрів

З розвитком технологій маркшейдерське забезпечення в гірничій промисловості досягає нового рівня. Все частіше компанії відмовляються від ручних методів збору даних на користь автоматизації. Робототехніка та автоматизовані тахеометри стали революційними технологіями, що трансформують традиційний підхід до маркшейдерських робіт. Їхній тандем не лише автоматизує складні процеси, а й суттєво підвищує продуктивність, зменшує витрати часу та забезпечує оптимальний рівень безпеки для працівників. Це особливо критично в контексті відкритої розробки залізної руди, де обсяги робіт і потенційні ризики вимагають впровадження інноваційних рішень.

Автоматизовані тахеометри давно трансформувалися з удосконалених версій традиційних геодезичних інструментів. Вони перетворилися на інтелектуальні інструменти, які можуть суттєво спростити щоденні завдання маркшейдерів. Це справжній «інтелектуальний асистент», який здійснює найточніші вимірювання практично без людської участі, знімаючи значну частину рутинних завдань з плечей фахівців.

# 3.5.1 Переваги автоматизованих тахеометрів у гірничій інженерії

Абсолютна точність та мінімальні похибки. Тахеометри функціонують з точністю, що часто перевищує людські здібності. Наприклад, прилади преміум-класу можуть вимірювати відстані з точністю до міліметра на відстанях, що перевищують один кілометр. Це критично важливо при зйомці великих кар'єрів, оскільки будь-яка похибка може призвести до неточного обліку обсягів породи або зміщення меж розробки.

Швидкість, що економить час і ресурси. Час є найціннішим ресурсом у гірничодобувній індустрії. Автоматизовані тахеометри значно зменшують тривалість вимірювальних процесів. Те, що раніше вимагало годин або навіть днів, тепер здійснюється за кілька хвилин.

Діяльність у важкодоступних локаціях. Гірничі кар'єри завжди пов'язані з ризиками: круті схили, обвали, зсуви ґрунту. Автоматизовані тахеометри здатні функціонувати дистанційно, що дає змогу здійснювати вимірювання в умовах, де фізична присутність особи є небезпечною.

Тривалий нагляд. Автоматизовані тахеометри можуть бути встановлені стаціонарно для тривалого моніторингу вибраних ділянок. Це вкрай корисно для моніторингу стану схилів або прогнозування потенційних зсувів.

Інтеграція з альтернативними системами. Сучасні тахеометри без зусиль інтегруються з геоінформаційними системами (ГІС), програмами для створення тривимірних моделей та системами управління транспортом у кар'єрі (рис. 3.10).

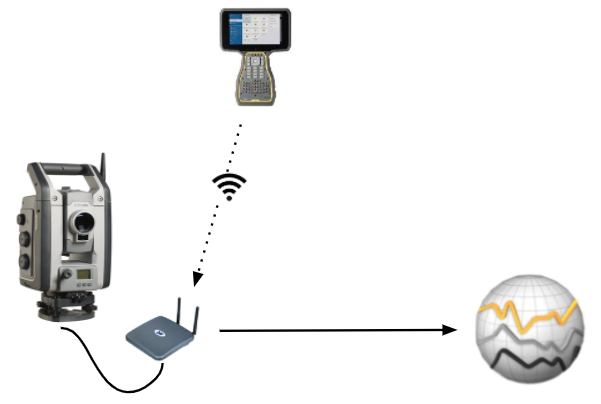


Рис. 3.10 Принцип передачі даних до автоматизованих систем обробки

Роботи стали реальністю в гірничодобувній галузі, а не лише фантастикою. Здатність автономно виконувати складні завдання робить робототехніку незамінною в умовах, де ризики для життя та здоров'я працівників надзвичайно високі.

Наземні роботизовані системи – це автономні платформи, що переміщуються кар’єром для проведення вимірювань, збору даних та моніторингу стану поверхні. Вони оснащені лазерними сканерами, тахеометрами та GPS/GNSS-приймачами, що забезпечує їхню функціональність у найскладніших умовах. Вони здатні:

* збирати геометричні дані для створення цифрових моделей кар'єру;
* проводити моніторинг змін у рельєфі після вибухових робіт;
* виявляти тріщини або інші потенційно небезпечні ділянки.

Основною перевагою інтеграції автоматизованих тахеометрів і робототехніки є формування єдиної цифрової платформи управління:

1. Автоматизований збір інформації

Техніка та тахеометри функціонують спільно, акумулюючи дані про рельєф, обсяги видобутку та стан схилів. Дані надходять в режимі реального часу, що сприяє швидкому прийняттю рішень.

1. Інтегрована аналітика

Зібрані дані автоматично аналізуються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, такого як Trimble Business Center, Leica Captivate або ArcGIS. Це забезпечує отримання звітів та моделей без необхідності додаткової ручної обробки.

1. Віддалене спостереження та управління

Усі системи можуть бути інтегровані в єдиний центр управління, що забезпечує дистанційний контроль за роботою роботів і тахеометрів, отримання даних та корекцію процесів.

# 3.5.2 Інтеграційне програмне забезпечення

Для забезпечення злагодженої роботи всіх компонентів системи необхідне спеціалізоване програмне забезпечення:

* Trimble 4D Control: забезпечує моніторинг змін рельєфу та контроль за роботою роботів і тахеометрів в режимі реального часу;
* Leica GeoMoS: забезпечує тривалий моніторинг та аналіз змін у критичних точках кар'єру;
* Autodesk Civil 3D: використовується для створення цифрових моделей місцевості та інтеграції геодезичних даних при проектуванні кар'єрів.

Інтеграція робототехніки та автоматизованих тахеометрів стосується не лише ефективності. Це стосується безпеки, точності та адаптивності в умовах швидких змін у гірничих роботах:

* точність – завдяки роботам та автоматизованим пристроям можна отримувати дані, яким завжди можна довіряти;
* безпека працівників – роботи виконують завдання в найнебезпечніших зонах, зменшуючи ризик для персоналу;
* економія часу та ресурсів – автоматизація сприяє оптимізації процесів, зменшуючи час та витрати на виконання завдань;

Інтеграція робототехніки та автоматизованих тахеометрів становить новий стандарт у маркшейдерії при відкритій розробці залізної руди. Ці технології забезпечують підприємствам можливість функціонувати з більшою точністю, швидкістю та безпекою, сприяючи сталому розвитку гірничої індустрії.

# ВИСНОВКИ

Зведений аналіз отриманих результатів виявляє, що впровадження автоматизації у маркшейдерське забезпечення відкритої розробки залізної руди не є звичайним технологічним вдосконаленням або поступовим покращенням наявних методів. Ідеться про якісно новий спосіб взаємодії з гірничим простором, орієнтований на системний підхід до збору та опрацювання даних, оперативне оновлення інформації й створення інтегрованого цифрового середовища.

Якщо раніше геодезичні вимірювання базувалися на обмеженій кількості точок, вибірковій фіксації рельєфу та тривалому процесі подальших обчислень, то нині автоматизовані технології перетворили цей трудомісткий ланцюг на ефективну й динамічну систему. Завдяки лазерному скануванню стало можливим за лічені хвилини отримати детальні тривимірні моделі кар’єру з мільйонами точок, які фіксують найтонші особливості рельєфу. Безпілотні літальні апарати спроможні швидко охопити значні площі, що раніше вимагало би кількох днів напруженої праці, підвищуючи деталізацію та оперативність даних. Супутникові системи (GPS/GNSS) забезпечують точне позиціонування й синхронізацію інформації, усуваючи залежність від складних мереж наземних опорних пунктів. Усі ці інструменти органічно поєднуються з геоінформаційними системами та спеціальним програмним забезпеченням, утворюючи єдине цифрове середовище, здатне інтегрувати геологічну, геофізичну, технічну, логістичну та екологічну інформацію в єдину базу знань.

Підприємства, які впроваджують такий підхід, отримують змогу своєчасно та обґрунтовано реагувати на зміни у кар’єрі, приймаючи рішення на основі актуальних тривимірних моделей, а не застарілих чи фрагментарних даних. Це знижує ризик прорахунків у плануванні, забезпечує кращу стабільність бортів, дає змогу оптимізувати вибухові роботи та раціональніше використовувати техніку. В умовах постійних коливань на сировинних ринках і необхідності відповідати зростаючим вимогам щодо ефективності та безпечності виробництва, такий ступінь контролю та гнучкості стає конкурентною перевагою.

Крім економічного виміру, автоматизація маркшейдерського забезпечення має істотне значення для безпеки й комфорту праці. Працівникам більше не потрібно наближатися до небезпечних зон, ризикуючи здоров’ям і життям. Натомість роботизовані платформи та дрони можуть обстежувати проблемні ділянки, передаючи точні дані в режимі, наближеному до реального часу. Це дає змогу інженерно-технічному персоналу концентруватися на аналітичних та управлінських завданнях, приділяючи більше уваги довгостроковим стратегіям, ніж рутинним операціям. У результаті покращується якість управлінських рішень, знижується ймовірність аварій, мінімізуються витрати на компенсацію помилок і простої обладнання.

З екологічного погляду точні цифрові моделі кар’єру дозволяють прогнозувати розвиток гірничих робіт з урахуванням екосистемних обмежень. Це може допомогти зменшити негативний вплив на довкілля, підвищити рівень екологічної культури підприємства, уникати необґрунтованих витрат ресурсів та планувати майбутні кроки з урахуванням довгострокових наслідків.

Наукова і технічна база, що виникає довкола автоматизації маркшейдерського забезпечення, стимулює міждисциплінарні дослідження. Геодезисти, геологи, інженери, айті-фахівці та економісти спільно шукають оптимальні рішення, розробляють нові алгоритми, вдосконалюють програмні платформи, розглядають можливості машинного навчання та штучного інтелекту. Це формує підґрунтя для подальших інновацій, появи нових спеціалізацій і зміцнення галузі.

Отже, автоматизація маркшейдерського забезпечення відкритої розробки залізної руди – це не просто логічний етап технічного прогресу, а докорінна перебудова усталених методів. Вона допомагає гірничим підприємствам переходити від клопітких, небезпечних і приблизних процедур до керованих, точних, безпечних та аналітично насичених процесів. У підсумку такий перехід сприяє підвищенню економічної доцільності, безпеки персоналу та екологічної відповідальності, робить підприємства більш гнучкими, інноваційними та здатними гідно відповідати на сучасні виклики. Це принципово нова логіка ведення гірничих робіт, що поєднує практичний досвід, інженерну думку, інформаційні технології та науково обґрунтований підхід, відкриваючи шлях до сталого розвитку гірничодобувної індустрії у глобальному масштабі.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вовк А., Глотов В., Гуніна А. Аналіз результатів для створення ортофотопланів та цифрових моделей рельєфу із застосуванням БПЛА Trimble UX-5. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2015. №81. С. 90–103.
2. Nguyen Q.L., Le Thi T.H., Tong S.S., Kim T.T.H. UAV photogrammetry-based for open pit coal mine large scale mapping, case studies in Cam Pha City, Vietnam. Sustain. Dev. Mt. Territ. 2020. Vol. 12. P. 501–509.
3. Барладін О.В., Ярошук П.Д. Використання космічних знімків високої просторової розрізненості для створення фотоатласу міста (на прикладі Києва). Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географія. 2006. Т. 19 (58), №2. С. 78–82.
4. Rinaudo F., Chiabrando F., Lingua A., Spanò A. Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry can be an answer. Int. Arch. Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Inf. Sci. 2012. Vol. XXXIX-B5. P. 583–588.
5. Глотов В., Церклевич А., Збруцький О. Аналіз і перспективи аерознімання з безпілотного літального апарата. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2014. №1 (27). С. 131–136.
6. Falkingham P.L. Acquisition of high resolution three-dimensional models using free, open-source, photogrammetric software. Palaeontologia Electronica. 2011. Vol. 15. P. 1–15.
7. Шульц Р.В., Войтенко С.П., Крельштейн П.Д., Маліна І.А. До питання розрахунку точності визначення координат точок під час знімання з безпілотних літальних апаратів. Інженерна геодезія. 2015. №62. С. 124–135.
8. Zongjian L. UAV for mapping–low altitude photogrammetric survey. Int. Arch. Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Inf. Sci. 2008. Vol. 37. P. 1183–1186.
9. Бурштинська Х.В., Станкевич С.А. Аерокосмічні знімальні системи: навч. посіб. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2010. 292 с.
10. Nguyen L.Q. Accuracy assessment of open-pit mine’s digital surface models generated using photos captured by Unmanned Aerial Vehicles in the post-processing kinematic mode. J. Min. Earth Sci. 2021. Vol. 62. P. 38–47.
11. Дорожинський О.Л. Аналітична та цифрова фотограмметрія. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2002. 163 с.
12. Beretta F., Shibata H., Cordova R., Peroni R.d.L., Azambuja J., Costa J.F.C.L. Topographic modelling using UAVs compared with traditional survey methods in mining. REM-Int. Eng. J. 2018. Vol. 71. P. 463–470.
13. Барладін О.В. Методичні аспекти інтегрування космознімків в ГІС – Києва. IX Міжнар. наук.-техн. симпозіум: Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища GPS і GIS-технологій. 2004. С. 72–74.
14. Bui X.N., Lee C., Nguyen Q.L., Adeel A., Cao X.C., Nguyen V.N., Le V.C., Nguyen H., Le Q.T., Duong T.H. Use of unmanned aerial vehicles for 3D topographic mapping and monitoring the air quality of open-pit mines. Inzynieria Mineralna. 2019. Vol. 21.
15. Дорожинський О.Л. Основи фотограмметрії. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2003. 212 с.
16. Nguyen Q.L., Goyal R., Le V.C., Cao X.C., Pham V.C., Bui N.Q., Bui X.N., Bui K.L. Influence of flight height on the accuracy of UAV derived digital elevation model at complex terrain. Inzynieria Mineralna. 2020.
17. Гарасимчук І.М. Автоматизовані системи для маркшейдерських робіт: навч. посіб. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2016. 210 с.
18. Gonzalez-Aguilera D. 3D modelling and accuracy assessment of granite quarry using unmanned aerial vehicle. 2012. Р. 55-78.
19. Ткаченко Р.П. Оптимізація фотограмметричних методів вимірювань у маркшейдерії: монографія. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2018. 130 с.
20. Battulwar R., Winkelmaier G., Valencia J., Naghadehi M.Z., Peik B., Abbasi B., Parvin B., Sattarvand J. A practical methodology for generating high-resolution 3D models of open-pit slopes using UAVs: flight path planning and optimization. Remote Sens. 2020. Vol. 12. P. 22–83.
21. Петренко Г.М. Застосування аерофототопографічних методів у маркшейдерії відкритих розробок: монографія. Київ: Вид-во КНУБА, 2020. 175 с.
22. Tong X., Liu X., Chen P., Liu S., Luan K., Li L., Liu S., Liu X., Xie H., Jin Y. Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of open-pit mine areas. Remote Sens. 2015. Vol. 7. P. 6635–6662.
23. Савчук М.С., Остапчук В.Г. Порівняльний аналіз традиційних та безпілотних методів маркшейдерських зйомок: монографія. Дніпро: НГУ, 2022. 160 с.
24. Wang Q., Wu L., Chen S., Shu D., Xu Z., Li F., Wang R. Accuracy evaluation of 3D geometry from low-attitude UAV images: a case study at Zijin Mine. Int. Arch. Photogrammetry, Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2014. Vol. 4. Р.40-46.
25. Сидоренко В.Д., Машков Б.Г. Цифрова фотограмметрія та її застосування в маркшейдерських роботах: навч. посіб. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2017. 200 с.
26. Ulusoy I., Sen E., Tuncer A., Sonmez H., Bayhan H. 3D multi-view stereo modelling of an open mine pit using a lightweight UAV. Turkiye Jeoloji Bulteni. 2017. Vol. 60. P. 223–242.
27. Labant S., Stsnkova H., Weiss R. Geodetic determining of stockpile volume of mineral excavated in open pit mine. GeoSci Eng. 2013. Vol. 59. P. 30–40.
28. Forlani G., Dall’Asta E., Diotri F., Cella U.M.D., Roncella R., Santise M. Quality assessment of DSMs produced from UAV flights georeferenced with on-board RTK positioning. Remote Sens. 2018. Vol. 10. P. 311.
29. Schulz T., Ingensand H. Influencing variables, precision and accuracy of terrestrial laser scanners. Ingeo, Bratislava. 2004. P. 13–21.
30. Nguyen N.V. Building DEM for deep open-pit coal mines using DJI Inspire 2. J. Min. Earth Sci. 2020. Vol. 61. P. 1–10.
31. Brunetaud X., Luca L.D., Janvier-Badosa S., Beck K., Al-Mukhtar M. Application of digital techniques in monument preservation. Eur. J. Environ. Civil. Eng. 2012. Vol. 16. P. 543–556.
32. Гуніна А., Глотов В. Недоліки правового регулювання застосування БПЛА. GeoTerrace-2018: міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених, Львів, 13–15 грудня 2018 р. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2018. С. 188–189.
33. Salvini R., Mastrorocco G., Seddaiu M., Rossi D., Vanneschi C. The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modelling. Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2017. Vol. 8. P. 34–52.
34. Chen C.S., Lin H.C. Estimating pit-excavation volume using cubic spline volume formula. J. Surv. Eng. 1991. Vol. 117. P. 51–66.
35. Мельник О.А., Головко М.Г. Порівняння наземної лазерної зйомки та фотограмметрії при моделюванні кар’єрних виробок. Інженерна геодезія. 2020. №72. С. 23–31.
36. Aguilar M.A., Aguilar F.J., Aguera F., Carvajal F. The evaluation of close-range photogrammetry for the modelling of mouldboard plough surfaces. Biosyst. Eng. 2005. Vol. 90. P. 397–407.
37. Filipova, S., Filipov, D., Raeva, P. Creating 3D model of an open pit quarry by UAV imaging and analysis in GIS // International Conference on Cartography and GIS. 2016. P. 652-670.
38. Bendea H., Chiabrando F., Tonolo F.G., Marenchino D. Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV. XXI Int. CIPA Symposium, Athens, Greece, 1–6 Oct. 2007.
39. Іванов П.П., Климчук О.В. Автоматизація маркшейдерських зйомок при розробці кар’єрів. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2019. №90. С. 45–53.
40. Krsak B., Blistan P., Paulikova A., Puskarova P., Kovanic L.M., Palkova J., Zeliznakova V. Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study. Measurement. 2016. Vol. 91. P. 276–287.
41. Левченко С.В. Використання ГІС-технологій в маркшейдерії: монографія. Київ: Наукова думка, 2015. 176 с.
42. Chirico P.G., DeWitt J.D. Mapping informal small-scale mining features in a data-sparse tropical environment with a small UAS. J. Unmanned Vehicle Systems. 2017. Vol. 5. P. 69–91.
43. Baltsavias, E.P. A comparison between photogrammetry and laser scanning // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999. Vol. 54. P. 83–94.
44. Shahbazi, M., Sohn, G., Theau, J., Menard, P. UAV-based point cloud generation for open-pit mine modelling // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2015. – Vol. 40.
45. Katuruza, M., Birch, C. The use of unmanned aircraft system technology for highwall mapping at Isibonelo Colliery, South Africa // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2019. – Vol. 119. – P. 291–295.
46. Van Le C., Cuong C.X., Nguyen Q., Anh T.T., Xuan-Nam B. Experimental investigation on the performance of DJI Phantom 4 RTK in the PPK mode for 3D mapping open-pit mines. Inzynieria Mineralna. 2020. Vol. 1. P. 65–74.
47. Esposito G., Mastrorocco G., Salvini R., Oliveti M., Starita P. Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. Environ. Earth Sci. 2017. Vol. 76. P. 103.
48. Rathore I., Kumar N.P. Unlocking the potentiality of UAVs in mining industry and its implications. Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol. 2015. Vol. 4. P. 852–855.
49. Wang Y., Fan Z., You Y. Application research of earth volume calculation based on 3D laser point cloud data. IOP Conf. Series: Materials Sci. Eng. 2020. Vol. 780. P. 32-50.
50. Tscharf A., Rumpler M., Fraundorfer F., Mayer G., Bischof H. On the use of UAVs in mining and archaeology-geo-accurate 3D reconstructions using various platforms and terrestrial views. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2015. Vol. 2. P. 15–22.
51. Barba S., Barbarella M., Di Benedetto A., Fiani M., Limongiello M. Comparison of UAVs performance for a Roman Amphitheatre survey: The case of Avella (Italy). Int. Conf. Geomatics and Restoration (XLII-2/W11), Milan, Italy, 8–10 May 2019. P. 179–186.
52. Шпак О.П. Обробка даних БПЛА-фотограмметрії для маркшейдерського забезпечення кар’єрів. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2021. №95. С. 55–61.
53. Carbonell M., Karara H.M. (ed.). Architectural photogrammetry. Nontopographic photogrammetry. Falls Church, Virginia: ASPRS, 1989. Р. 450-480.
54. Cho, S.-J., Bang, E.-S., Kang, I.-M. Construction of precise digital terrain model for nonmetal open-pit mine by using unmanned aerial photograph // Econ. Environ. Geol, 2015. Vol. 48. P. 205–212.
55. Kang, S., Lee, G.-J., Noh, J., Jang, H.D., Kim, S.-M., Ko, C.-S. 3-dimensional modeling and mining analysis for open-pit limestone mine stope using a rotary-wing unmanned aerial vehicle // J. Eng. Geol, 2018. Vol. 28. P. 701–714.