

А.В. Панасюк, к.т.н., доц.  
В.О. Шлапак, к.т.н., доц.  
Д.О. Тарнавський, студент  
Я.Р. Шапар, студент

Державний університет «Житомирська політехніка»

## Інтеграція GNSS-технологій у систему геодезичного моніторингу та управління гірничим транспортом

У статті розглянуто теоретичні, методологічні та практичні аспекти інтеграції GNSS-технологій у систему геодезичного моніторингу та управління гірничим транспортом у контексті цифрової трансформації гірничої галузі. Визначено ключові фактори, що впливають на точність супутникового позиціонування в умовах відкритих гірничих робіт, зокрема геометрію супутникового сузір'я, атмосферні затримки, мультипас-ефект і технічні характеристики приймачів. Проведено систематизацію сучасних диференційних методів позиціонування (RTK, PPK, DGPS, PPP) та здійснено порівняльну оцінку їх точності. Результати дослідження засвідчили, що використання режимів RTK і PPP забезпечує сантиметрову точність координат, що є критично важливою для керування транспортними потоками, моніторингу робочих зон і побудови цифрових моделей рельєфу. Проаналізовано практичні результати впровадження GNSS-систем на українських гірничих підприємствах (Ferrexpo, Інгулецький, Південний ГЗК) та у світових компаніях (Rio Tinto, BHP Billiton, Caterpillar). Встановлено, що застосування GNSS-моніторингу дає змогу зменшити прості техніки на 10–15 %, підвищити продуктивність на 8–12 % та скоротити витрати пального на 5–9 %. Впровадження GNSS-модулів у поєднанні з інерціальними системами (INS) і технологіями LiDAR та БПЛА сприяє створенню інтегрованих комплексів просторового контролю, що підвищують деталізацію цифрових моделей місцевості та знижують сумарну похибку позиціонування до 0,04–0,05 м. Запропоновано алгоритм оцінювання ефективності впровадження GNSS-технологій на основі інтегрального показника, який враховує технічні, економічні й організаційні чинники. Доведено, що впровадження комплексних GNSS-систем є ключовим елементом концепцій Smart Quarry і Digital Twin, які забезпечують автоматизацію управління транспортом, підвищення безпеки праці та створення динамічних тривимірних моделей кар'єру. Окреслено перспективи подальших досліджень, пов'язаних із розробленням інтелектуальних систем GNSS–LiDAR–AI для автоматичного аналізу геодезичних даних і прогнозування виробничих ситуацій у режимі реального часу.

**Ключові слова:** GNSS; RTK; PPK; PPP; LiDAR; INS; геодезичний моніторинг; гірничий транспорт; Smart Quarry; цифрова трансформація.

**Актуальність теми.** Сучасна гірнича промисловість перебуває у стані активної цифрової трансформації, що супроводжується впровадженням інтелектуальних систем управління, автоматизації технологічних процесів і комплексного геодезичного моніторингу. Однією з базових складових цього процесу є використання глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*), що забезпечують високоточне визначення просторових координат об'єктів у реальному часі.

У гірничих підприємствах системи GNSS застосовуються для вирішення широкого кола завдань: керування рухом транспортних засобів, контролю положення робочих органів екскаваторів, моніторингу деформацій уступів і відвалів, а також для геодезичного супроводу буровибухових робіт. Інтеграція GNSS у диспетчерські системи управління транспортом дозволяє здійснювати позиціонування у реальному часі з точністю до кількох сантиметрів, що суттєво підвищує продуктивність та безпеку праці [1–3].

Проблематика дослідження полягає у визначенні оптимальних методів і параметрів позиціонування для кар'єрних умов, де сигнал GNSS може спотворюватися внаслідок рельєфу, багатопроменевого ефекту, атмосферних збурень і тінювих зон. Відповідно, актуальним є завдання розроблення комплексного підходу до інтеграції GNSS у систему геодезичного моніторингу, який поєднує супутникові, класичні й інерціальні методи вимірювань.

**Метою статті** є системний аналіз ефективності впровадження GNSS-технологій у систему управління гірничим транспортом і геодезичного моніторингу, узагальнення практичного досвіду українських і зарубіжних підприємств та визначення перспектив розвитку технологій у контексті цифрової трансформації гірничої галузі.

**Викладення основного матеріалу.** Точність GNSS-позиціонування визначається багатьма факторами, серед яких найважливішими є геометрія супутникового сузір'я, вплив іоносфери та тропосфери, мультиплас-ефекти, тип приймача й якість антен. Для гірничих підприємств, де часто спостерігаються тіньові зони та обмежена видимість супутників, застосування звичайного автономного режиму GPS є недостатнім. Тому у практиці геодезичного забезпечення використовуються диференційні методи – RTK (Real Time Kinematic), PPK (Post Processing Kinematic), DGPS (Differential GPS) та PPP (Precise Point Positioning), які забезпечують сантиметрову точність.

Рівняння спостереження для супутникових вимірювань можна подати у вигляді:

$$p_i = c \cdot (t_r - t_{si}) + d_i,$$

де  $p_i$  – псевдовідстань до  $i$ -го супутника;

$c$  – швидкість світла;

$t_r$  – час прийому сигналу;

$t_{si}$  – час передавання сигналу супутником;

$d_i$  – сукупна похибка сигналу (іоносферна, тропосферна, апаратна).

Це рівняння є базовим для визначення поправок у режимах диференційного позиціонування.

У таблиці 1 наведено порівняльні показники точності основних GNSS-методів, що використовуються у гірничих кар'єрах.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики методів GNSS-позиціонування

Метод	Режим роботи	Середня похибка, м	Особливості застосування
GPS (автономний)	Одиночний приймач	±3,0–5,0	Орієнтовне позиціонування, низька точність
DGPS	Корекція SBAS або наземна станція	±0,5–1,0	Моніторинг рухомих об'єктів
RTK	В реальному часі з базовою станцією	±0,02–0,05	Геодезичні вимірювання, моніторинг техніки
PPK	Постобробка з корекціями	±0,03–0,07	Контроль точності після вимірювань
PPP	Глобальні корекції (IGS)	±0,01–0,03	Високоточні вимірювання у будь-якій точці світу

Порівняння показує, що використання диференційних технологій RTK і PPP дає змогу досягати сантиметрової точності, що є критично важливим для керування гірничим транспортом, побудови цифрових моделей рельєфу та контролю переміщень земної поверхні.

Розподіл точності для різних методів наведено на рисунку 1, який ілюструє зміну похибки залежно від режиму позиціонування.

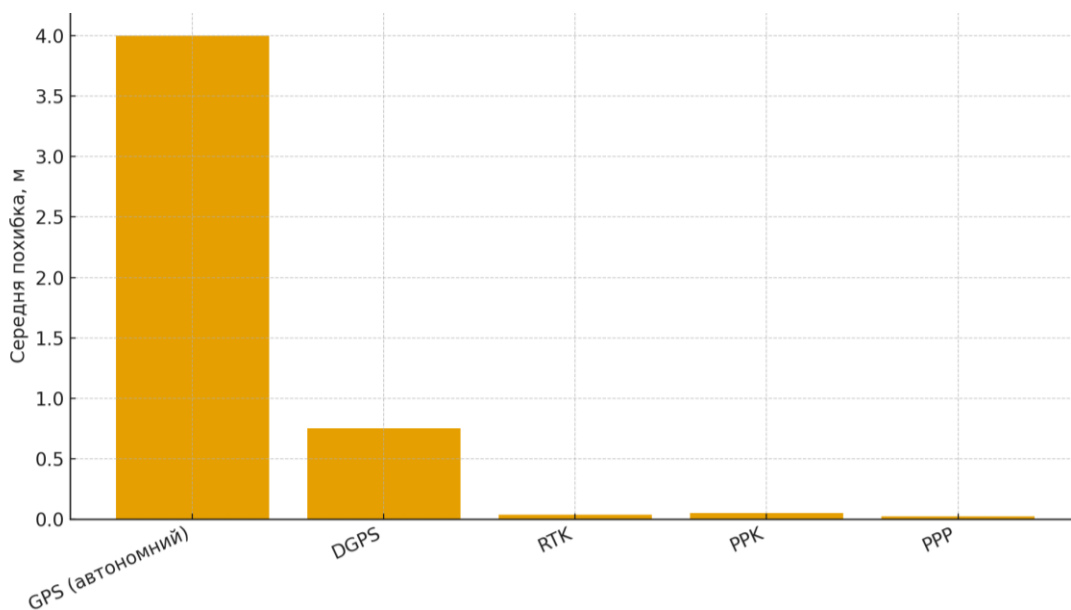


Рис. 1. Залежність точності GNSS-вимірювань від режиму позиціонування

Для оцінювання середньої квадратичної похибки (СКП) координат застосовується стандартна формула:

$$m_p = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2},$$

де  $m_x, m_y, m_z$  – похибки визначення координат у відповідних осях. У кар’єрних умовах значення ( $m_p$ ) зазвичай становить 0,02–0,05 м при стабільному прийомі сигналів і може зрости до 0,1 м при частковому затінненні горизонту.

Розрахунок СКП дозволяє порівняти стабільність результатів різних GNSS-приймачів у польових умовах. Інтеграція GNSS-приймачів у систему управління гірничим транспортом забезпечує перехід до режиму повної автоматизації та диспетчеризації руху техніки. Така система містить базові станції, рухомі GNSS-модулі, інерціальні датчики, радіомодеми та сервер управління. Дані позиціонування надходять у центр управління з частотою 1–10 Гц, де відбувається їх аналіз і візуалізація на цифровій карті кар’єру.

Впровадження GNSS-технологій дозволяє: автоматизувати маршрути руху самоскидів та екскаваторів; зменшити витрати пального; підвищити точність навантаження і координування транспорту; оптимізувати черги на завантаження та розвантаження; забезпечити контроль техніки у режимі реального часу.

Для оцінки ефективності інтеграції GNSS використовується коефіцієнт економічного ефекту ( $K_{ef}$ ), який визначається як:

$$K_{ef} = \frac{E_{до} - E_{після}}{E_{до}} \cdot 100\%,$$

де  $E_{до}$  та  $E_{після}$  – витрати до і після впровадження системи.

Цей коефіцієнт дозволяє оцінити економію пального, скорочення простоїв або збільшення продуктивності. Наведено ефективність упровадження GNSS-систем на підприємствах (табл. 2 та рис. 2).

Таблиця 2

Порівняльна ефективність упровадження GNSS-систем на підприємствах

Підприємство	Точність позиціонування, м	Зменшення простоїв, %	Підвищення продуктивності, %
Фергехро (Полтавський ГЗК)	0,03–0,05	14	10–12
Інгулецький ГЗК	0,03–0,05	12	9
Південний ГЗК	0,04	15	11
Rio Tinto (Австралія)	0,02	—	20
BHP Billiton	0,03	—	15
Caterpillar MineStar™	0,05	15–18	20

Порівняння результатів показує, що впровадження GNSS у системи управління транспортом на українських гірничих підприємствах дозволило скоротити простой на 10–15 %, а продуктивність збільшити на 8–12 %. Аналогічні показники фіксуються у світових корпораціях, що впроваджують комплексні системи *MineStar™*, *Modular Mining* та *Wenco*.

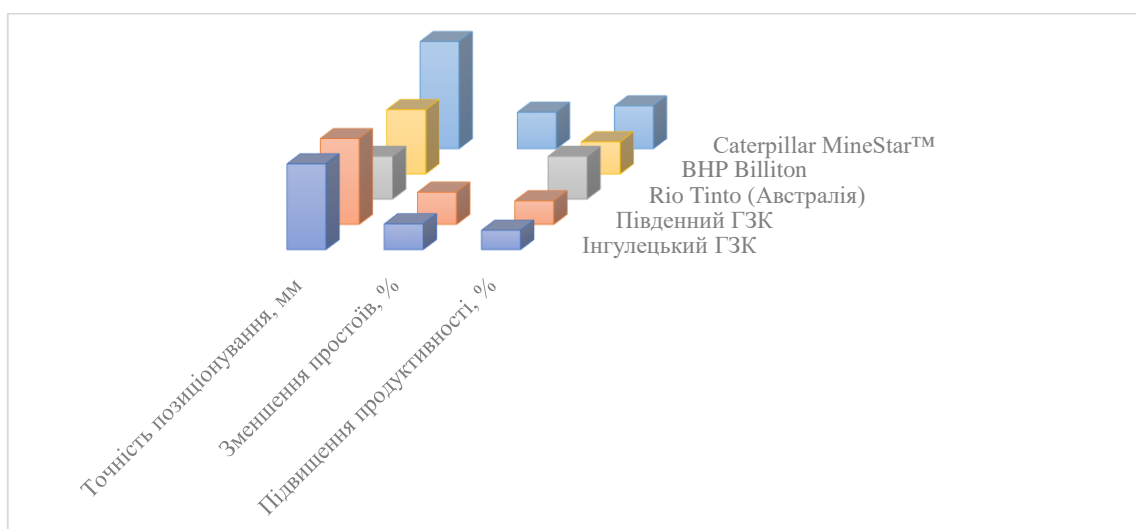


Рис. 2. Вплив упровадження GNSS на продуктивність транспорту

Для розрахунку зміни продуктивності використовується вираз:

$$\Delta K = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100 \%,$$

де  $P_1$  та  $P_2$  – середня продуктивність до і після впровадження системи.

Інтеграція GNSS-технологій у систему керування транспортом передбачає також використання аналітичних модулів, що виконують прогнозування затримок, контроль оптимальних маршрутів і розрахунок навантаження на техніку. Дані GNSS синхронізуються з базою технічного обслуговування машин, що дає змогу відстежувати ресурс вузлів і попереджати аварійні ситуації.

Ефективність GNSS-систем значно підвищується при їх поєднанні з іншими засобами просторового моніторингу, зокрема лідарними системами (LiDAR), безпілотними літальними апаратами (БПЛА) та інерціальними навігаційними системами (INS). Комплексне використання цих технологій дає можливість створювати тривимірні цифрові моделі рельєфу з високою деталізацією та оперативністю оновлення (табл. 3 та рис. 3).

GNSS забезпечує глобальну просторову прив'язку, LiDAR – щільне хмарне покриття точок, а БПЛА – мобільність і швидкість збору даних. Комбіновані системи дозволяють суттєво зменшити похибку позиціонування, особливо в умовах часткового затінення сигналів.

Таблиця 3

Порівняльні характеристики сучасних систем просторового моніторингу

Система	Просторова точність, м	Продуктивність (га/год)	Основна перевага	Обмеження
GNSS (RTK)	±0,02–0,05	10–15	Реальний час, висока точність	Залежність від сигналу
LiDAR (наземний)	±0,03–0,05	1–2	Висока деталізація рельєфу	Висока вартість обладнання
LiDAR (аерофотозйомка)	±0,05–0,10	20–25	Швидке оновлення моделей	Залежність від погодних умов
БПЛА (фотограмметрія)	±0,03–0,07	30–40	Висока мобільність, економічність	Необхідність калібрування GNSS
INS (інерціальна система)	±0,10–0,20	–	Безперервність навігації	Похибка накопичується з часом

Для визначення сумарної похибки комбінованої системи застосовується формула (5):

$$\sigma_{\text{комб}} = \sqrt{\sigma_{\text{GNSS}}^2 + \sigma_{\text{LiDAR}}^2 + \sigma_{\text{INS}}^2},$$

де  $\sigma_{\text{GNSS}}$ ,  $\sigma_{\text{INS}}$ ,  $\sigma_{\text{LiDAR}}$  – середньоквадратичні похибки окремих вимірювань.

Результати розрахунку показують, що інтеграція GNSS і LiDAR дозволяє знизити сумарну похибку до 0,04–0,05 м, тоді як окреме використання кожної системи дає більші значення (до 0,1–0,2 м).

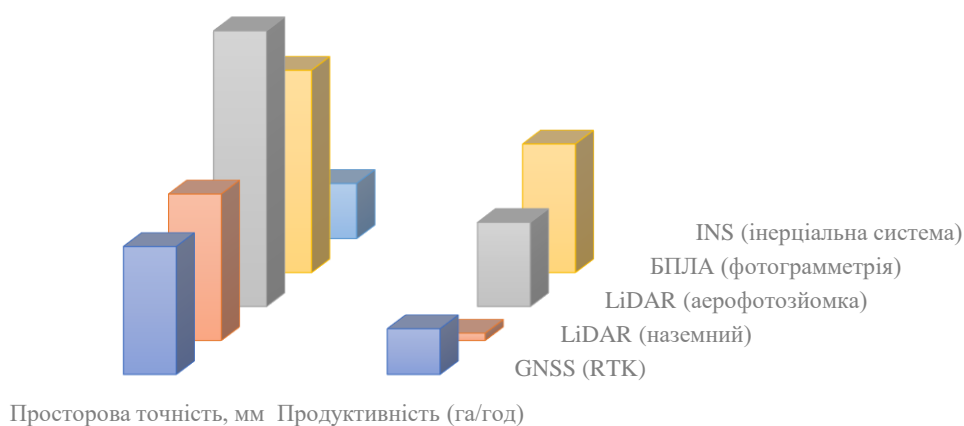


Рис. 3. Вплив комбінування GNSS і LiDAR на сумарну похибку позиціонування

Для оцінки приросту точності після комбінування застосовується відношення:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{окр} - \sigma_{комб}}{\sigma_{окр}} \times 100\%$$

де  $\sigma_{окр}$ ,  $\sigma_{комб}$  – похибка окремої технології та комбінованої системи відповідно.

Результати практичних досліджень показують, що комбіновані системи GNSS–LiDAR–INS підвищують точність побудови цифрових моделей рельєфу в середньому на 25–30 %, а час оновлення моделей зменшується у 2–3 рази.

У системах типу Smart Quarry така інтеграція дає змогу створювати «живі» 3D-кар'єри, у яких дані з різних сенсорів автоматично оновлюються на сервері управління.

Після впровадження систем GNSS у гірничих підприємствах України та світу спостерігається значне підвищення ефективності транспортних процесів, зменшення експлуатаційних витрат і покращення геодезичного контролю (табл. 4 та рис. 4). Для кількісної оцінки ефективності використовується інтегральний показник ( $I_{ef}$ ), який враховує технічні, економічні та організаційні параметри:

$$I_{ef} = \frac{1}{n} \cdot \sum \left( \frac{P_i}{P_{max}} \right) \cdot w_i,$$

де  $P_i$  – нормалізовані показники ефективності за окремими критеріями (продуктивність, точність, економія пального);

$P_{max}$  – максимальне значення показника серед усіх підприємств;

$w_i$  – вагові коефіцієнти;

$n$  – кількість показників.

Таблиця 4

Узагальнення показників ефективності GNSS на гірничих підприємствах

Підприємство	Економія пального, %	Зменшення простоїв, %	Зростання продуктивності, %	Інтегральний показник ( $I_{ef}$ )
Ferrexpo (Полтавський ГЗК)	6	14	11	0,87
Інгулецький ГЗК	5	12	9	0,81
Південний ГЗК	6	15	10	0,84
Rio Tinto	8	–	20	0,95
BHP Billiton	7	–	15	0,92
Caterpillar MineStar™	9	16	20	0,97

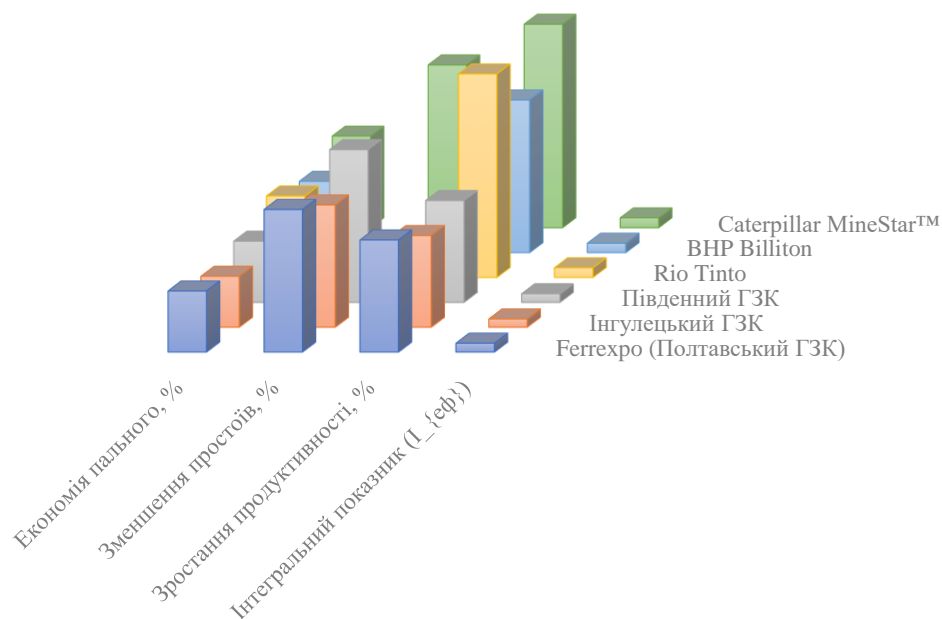


Рис. 4. Порівняння інтегральної ефективності GNSS-систем у різних компаніях

Використання GNSS дозволило знизити експлуатаційні витрати завдяки оптимізації маршрутів руху транспорту, зменшенню холостих пробігів і контролю за використанням пального. У середньому економія становить 5–9 %, що підтверджується результатами Ferrexpo, Інгулецького та Південного ГЗК та ряду іноземних підприємств (табл. 5 та рис. 5).

Крім економічного ефекту, фіксується покращення безпеки руху, зниження кількості простоїв техніки, а також підвищення якості геодезичного моніторингу.

На підприємствах, де GNSS інтегровано з LiDAR та БПЛА, забезпечено підвищення точності побудови цифрових моделей на 25–30 %. Впровадження режиму RTK/PPK дає змогу підтримувати стабільну точність 2–5 см у плановому положенні навіть у зонах часткового затінення сигналу.

У світовій практиці GNSS-технології активно інтегруються у системи Smart Mining та Digital Twin Quarry. Такі рішення забезпечують повну автоматизацію транспортних процесів, моніторинг у реальному часі та синхронізацію геодезичних даних із моделями гірничих робіт.

Таблиця 5

Порівняння ефективності GNSS-систем у кар'єрах України та світу

Країна / Підприємство	Точність позиціонування, м	Автоматизація процесів, %	Зменшення простоїв, %	Джерело
Україна (Ferrexpo)	0,03–0,05	45	14	[1]
Україна (Інгулецький ГЗК)	0,04	40	12	[1]
Австралія (Rio Tinto)	0,02	100	—	[5]
Канада (BHP Billiton)	0,03	90	—	[6]
США (Caterpillar MineStar™)	0,05	95	15–18	[7]

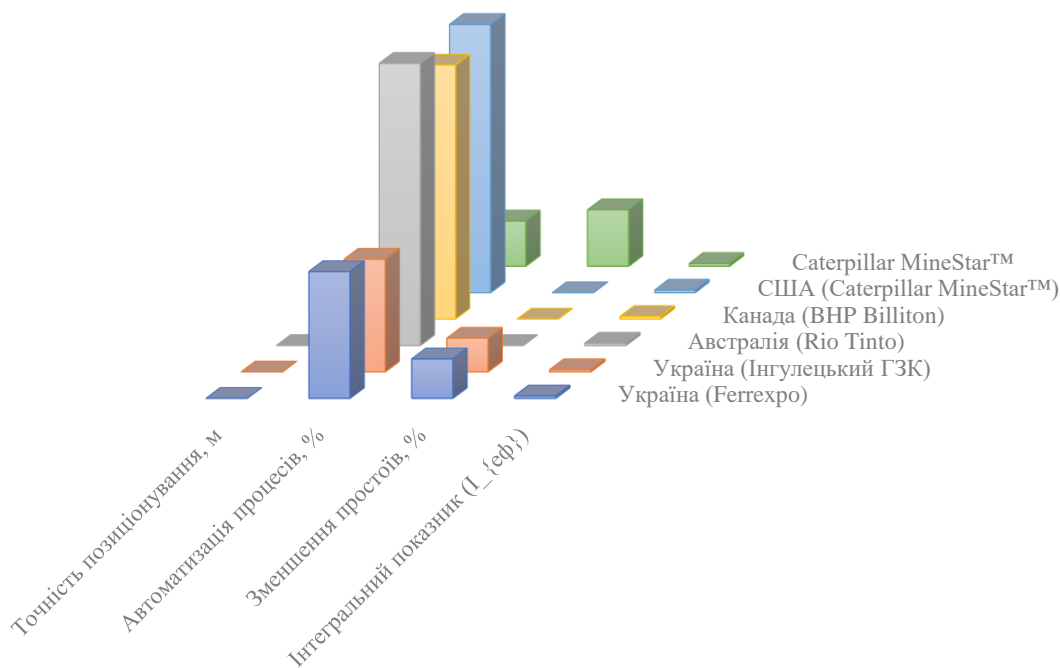


Рис. 5. Рівень автоматизації процесів у гірничих підприємствах із GNSS-системами

**Висновки.** Інтеграція GNSS-технологій у систему управління гірничим транспортом забезпечує підвищення точності позиціонування до 2–5 см, скорочення простоїв техніки на 10–15 % і зростання продуктивності на 8–12 %. Поєднання GNSS із LiDAR, INS і БПЛА дозволяє підвищити деталізацію цифрових моделей рельєфу та знизити сумарну похибку вимірювань до 0,04–0,05 м.

Міжнародний досвід підтверджує, що GNSS є ключовою складовою цифрової трансформації гірничої галузі, особливо у системах *Smart Quarry* і *Digital Twin*.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення інтегрованих комплексів GNSS–LiDAR–AI для автоматичного аналізу змін рельєфу та прогнозування виробничих ситуацій.

**Список використаної літератури:**

1. Коваленко В.І. Сучасні методи геодезичного забезпечення гірничих робіт / В.І. Коваленко, П.М. Риженко. – Кривий Ріг : НТУ, 2023. – 180 с.
2. Digital Mine Implementation Report 2023 / Ferrexpo Mining Group. – Poltava, 2023.
3. GNSS Positioning in Open-Pit Mining / Trimble Inc. – Technical White Paper, 2022.
4. Field procedures for GNSS instruments : ISO 17123-8:2020. – Geneva : ISO, 2020.
5. Mine of the Future Program Overview / Rio Tinto. – Perth, 2022.
6. Autonomous Haulage Systems Performance Report / BHP Billiton. – Santiago, 2023.
7. MineStar™ Fleet – Smart Mining Solutions / Caterpillar. – Peoria, 2021.
8. Galileo High Accuracy Service (HAS) User Guide / European GNSS Agency (GSA). – Prague, 2023.
9. Супутникові методи геодезичних вимірювань. Загальні вимоги : ДСТУ 4019:2022. – Київ : УкрНДНЦ, 2022.
10. Яковенко О.В. Геоінформаційні технології в управлінні кар'єрним транспортом / О.В. Яковенко, Д.І. Сахно // Вісник гірничих наук. – 2021. – № 2. – С. 34–41.

**References:**

1. Kovalenko, V.I. and Ryzhenko, P.M. (2023), *Suchasni metody heodezychnoho zabezpechennia hirnychych robot*, NTU, Kryvyi Rih, 180 p.
2. Ferrexpo Mining Group (2023), *Digital Mine Implementation Report 2023*, Poltava.
3. Trimble Inc (2022), *GNSS Positioning in Open-Pit Mining*, Technical White Paper.
4. *ISO 17123-8:2020. Field procedures for GNSS instruments* (2020), ISO, Geneva.
5. Rio Tinto (2022), *Mine of the Future Program Overview*, Perth.
6. BHP Billiton (2023), *Autonomous Haulage Systems Performance Report*, Santiago.
7. Caterpillar (2021), *MineStar™ Fleet – Smart Mining Solutions*, Peoria.
8. European GNSS Agency (GSA) (2023), *Galileo High Accuracy Service (HAS) User Guide*, Prague.
9. *DSTU 4019:2022. Suputnykovi metody heodezychnykh vymiruvann. Zahalni vymohy* (2022), UkrNDNTs, Kyiv.
10. Yakovenko, O.V. and Sakhno, D.I. (2021), «Heoinformatsiini tekhnolohii v upravlinni kariernym transportom», *Visnyk hirnychych nauk*, No. 2, pp. 34–41.

**Панасюк Андрій Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-7468-2022>.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія;
- дистанційне зондування землі;
- математичне моделювання;
- підземні гірничі роботи;
- оцінка ресурсів.

E-mail: [kgt\\_pav@ztu.edu.ua](mailto:kgt_pav@ztu.edu.ua).

**Шлапак Володимир Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4183-1922>.

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи;
- гірничий транспорт;
- маркшейдерська справа;
- переробка та збагачення корисних копалин.

E-mail: [v.shlapak@ztu.edu.ua](mailto:v.shlapak@ztu.edu.ua).

**Тарнавський Денис Олександрович** – студент II курсу освітнього ступеня «магістр» Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- маркшейдерія.

**Шапар Ярослав Романович** – студент II курсу освітнього ступеня «магістр» Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- маркшейдерія.

**Panasiuk A.V., Shlapak V.O., Tarnavsky D.O., Shapar Ya.R.**

**Integration of GNSS technologies into the geodesic monitoring and mining transport management system**

The paper examines the theoretical, methodological, and practical aspects of integrating GNSS technologies into the geodetic monitoring and mining transport management system within the context of the mining industry's digital transformation. The study identifies the main factors influencing satellite positioning accuracy in open-pit environments, including satellite constellation geometry, atmospheric delays, multipath effects, and receiver performance. A comprehensive classification of modern differential positioning methods (RTK, PPK, DGPS, PPP) is presented, and their accuracy is comparatively assessed. The results indicate that RTK and PPP modes provide centimeter-level coordinate precision, which is essential for transport flow management, operational zone monitoring, and digital terrain modeling. Practical implementation outcomes of GNSS-based monitoring systems are analyzed for Ukrainian mining enterprises (Ferrexpo, Inhulets, Pivdennyi) and international companies (Rio Tinto, BHP Billiton, Caterpillar). The findings reveal that GNSS integration reduces equipment downtime by 10–15 %, increases productivity by 8–12 %, and decreases fuel consumption by 5–9 %. The integration of GNSS receivers with inertial navigation systems (INS), LiDAR, and unmanned aerial vehicles (UAVs) enables the formation of comprehensive spatial monitoring complexes that improve terrain model resolution and reduce combined positioning errors to 0.04–0.05 m. An efficiency assessment algorithm for GNSS implementation is proposed based on an integrated indicator that accounts for technical, economic, and organizational parameters. The study proves that the deployment of complex GNSS-based systems represents a fundamental component of the Smart Quarry and Digital Twin concepts, which ensure transport automation, operational safety improvement, and dynamic three-dimensional quarry modeling. Future research directions include the development of intelligent GNSS–LiDAR–AI systems for automatic geospatial data analysis and predictive modeling of mining processes in real time.

**Keywords:** GNSS; RTK; PPK; PPP; LiDAR; INS; geodetic monitoring; mining transport; Smart Quarry; digital transformation.

Стаття надійшла до редакції 29.08.2025.