

М.С. Куницька, ст. викладач
Д.С. Поліщук, аспірант
О.В. Шапочніков, асистент
А.Г. Темченко, д.т.н., проф.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Аналіз стану розвитку геометризації та цифрового моделювання на відкритих гірничих підприємствах

Стаття присвячена дослідженню сучасних технологій геометризації та цифрового моделювання на відкритих гірничих підприємствах. Актуальність роботи зумовлена вимогами до оптимізації видобувних процесів, забезпечення безпеки праці та підвищення економічної ефективності при експлуатації родовищ. Методологією дослідження став системний аналіз, статистична обробка даних та вивчення наукових джерел з цифровізації гірничої галузі. На основі аналізу літератури та практичного досвіду встановлено, що найпоширенішими технологіями є 3D-моделювання (25 %) та геоінформаційні системи (20 %), які доповнюються системами автоматизованого проєктування (15 %), безпілотними системами (15 %), штучним інтелектом (15 %) та цифровими двійниками (10 %).

Визначено, що їх комплексне застосування забезпечує підвищення точності оцінки запасів на 15–20 % та зниження операційних витрат на 10–15 %. Виявлено ключові тенденції розвитку: інтеграцію цифрових технологій, вдосконалення методів збору та обробки геопросторових даних, впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозування ризиків. Доведено, що сучасні методи геометризації сприяють сталому розвитку галузі через підвищення ефективності використання ресурсів, зниження собівартості видобутку та мінімізацію впливу на довкілля.

Ключові слова: геометризація родовища; моделювання; геоінформаційні системи; цифрова модель.

Актуальність теми. Геометризація родовищ корисних копалин становить фундаментальний процес у гірничодобувній галузі, що безпосередньо впливає на оптимізацію видобутку, стратегічне планування та економічну рентабельність експлуатації мінеральних ресурсів. Цей процес охоплює комплексний аналіз та просторове моделювання геологічної структури і розташування мінеральних покладів, забезпечуючи всебічне розуміння їхньої морфології та характеристик.

Процес геометризації родовищ корисних копалин є невід'ємним компонентом сучасної гірничодобувної галузі. Цей підхід значно підвищує ефективність та безпеку видобувних операцій, забезпечує точність у визначенні запасів та оптимізує планування робіт, відповідаючи актуальним технологічним, економічним, екологічним та соціальним стандартам. Попри певну складність та фінансові витрати на впровадження, цей процес залишається обґрунтованим і стратегічно необхідним для забезпечення сталого розвитку видобувної промисловості.

Інноваційні технологічні рішення надають фахівцям передові інструменти, засоби й інформаційно-програмні комплекси для збору, обробки, аналізу, зберігання та візуалізації гірничо-геометричної інформації. Ці технології істотно підвищують результативність процесу геометризації, що дозволяє здійснювати більш прецизійне планування та управління розробкою родовищ у режимі реального часу. Сучасні досягнення в аналізі даних при геометризації родовищ суттєво підвищили точність та ефективність цього процесу. Впровадження інноваційних технологій та спеціалізованого програмного забезпечення уможливило створення цифрових моделей.

Новітні ГІС-інструменти забезпечують комплексну інтеграцію різноманітних інформаційних масивів та їх тривимірну візуалізацію, що сприяє поглибленому розумінню складних геологічних структур родовищ. Значним досягненням також є розвиток програмного забезпечення для моделювання, яке тепер включає функціонал для симуляції різноманітних сценаріїв розробки родовища та прогнозування потенційних наслідків. Аналітичні інструменти обробки геометричних даних стали потужнішими та прецизійнішими, що дозволяє здійснювати комплексний аналіз та оптимізацію моделей. Імплементація хмарних технологій розширює можливості для міждисциплінарної співпраці як у межах гірничодобувного підприємства, так і створює платформу для залучення фахівців з різних регіонів світу, забезпечуючи при цьому контрольований доступ до актуалізованих даних та моделей у реальному часі. Інтеграція структурних та геометричних даних з різноманітними джерелами інформації – сейсмічними дослідженнями, результатами буріння та опробування, маркшейдерськими зйомками та супутниковими знімками – забезпечує комплексний підхід до аналізу родовищ і сприяє виявленню прихованих закономірностей, які раніше не ідентифікувалися.

Використання передових програмних рішень надає потужні аналітичні інструменти та оптимізує співпрацю між фахівцями різних підрозділів, що прискорює прийняття рішень і підвищує достовірність розроблених моделей. Це також уможливило проведення симуляцій різних сценаріїв розробки родовищ у режимі реального часу, що має критичне значення для формування довгострокових стратегій та оцінювання потенційних ризиків.

Таким чином, сучасні інновації в процесах геометризації та моделювання родовищ корисних копалин сприяють більш ефективному плануванню та управлінню їх розробкою, що в підсумку підвищує економічну ефективність гірничодобувної діяльності та мінімізує екологічні ризики.

Отже, **актуальність теми** є очевидною.

Мета роботи:

1. Комплексний аналіз сучасного стану впровадження технологій геометризації та цифрового моделювання на відкритих гірничих підприємствах;
2. Виявлення основних тенденцій розвитку методів геометризації родовищ та цифрового моделювання в контексті сучасних технологічних досягнень.

Викладення основного матеріалу. В сучасних умовах видобувна галузь стикається з низкою викликів, що підвищують актуальність використання процесу геометризації. Технологічний прогрес відіграє значну роль у цьому контексті, адже новітні інформаційні технології, такі як 3D-моделювання, геоінформаційні системи (ГІС), дозволяють створювати більш точні та деталізовані моделі родовищ. Це своєю чергою сприяє комплексній розробці родовищ корисних копалин, підвищенню ефективності та безпеки видобувних робіт. Існує потреба максимальної ефективності використання ресурсів, і саме геометризація дозволяє оптимізувати процес видобутку, знижуючи витрати та підвищуючи рентабельність проєктів щодо розробки родовищ.

Геометризація просторового розподілу шкідливих елементів допомагає мінімізувати негативний вплив на довкілля. Розуміння розташування таких зон дозволяє краще управляти відходами та здійснювати рекультивацию територій. Це важливо для зниження ризику забруднення ґрунтів та водних ресурсів [1].

Соціальні аспекти також впливають на розвиток геометризації у видобувній галузі. Підвищення соціальної відповідальності бізнесу вимагає більш прозорого та відповідального підходу до видобутку корисних копалин. Геометризація сприяє забезпеченню прозорості та підвітності діяльності видобувних компаній перед суспільством, що є важливим елементом сталого розвитку галузі в цілому.

Використання цифрових технологій у гірничій справі сприяє підвищенню ефективності виробничих процесів, оптимізації ресурсів та забезпеченню безпеки праці. Найпоширенішими інструментами є 3D-моделювання та геоінформаційні системи, які застосовуються для візуалізації родовищ, планування видобутку та моніторингу стану кар'єрів.

Розвиток цифрового моделювання в гірничій справі отримав увагу від численних вчених, які досліджували різні аспекти застосування інноваційних технологій для підвищення ефективності видобувних процесів. У цифровому моделюванні системи відкритих гірничих підприємств було виявлено низку ключових проблем. Xu S. [2] зосереджувався на різних аспектах цифровізації у гірничій галузі. Їхні праці продемонстрували, що інтеграція ГІС та тривимірного моделювання підвищує точність планування видобутку та зменшує вплив людського фактора на операції. Śledziowski J. et al. [3] показали, що аерофотозйомка за допомогою безпілотників спрощує геодезичні вимірювання та автоматизує моніторинг об'єктів. Zeba G. et al. [4] досліджували роль штучного інтелекту у прогнозуванні зсувів та управлінні ризиками в реальному часі. Їхні дослідження підкреслюють важливість автоматизації та зменшення похибок вимірювань. Водночас деякі аспекти, такі як економічні бар'єри та потреба в спеціалізованій підготовці кадрів, згадувалися в роботі S.Saniuk et al., [5] демонструє необхідність подальших досліджень у напрямі навчання персоналу для ефективного використання нових технологій. Хоча дослідження вже окреслили значні переваги цифрових технологій, питання впровадження цифрових двійників, як зазначають A.Hazrathosseini і A.Afrapoli [6], все ще потребує додаткового вивчення через складність інтеграції таких систем у видобувні процеси.

Існує досить велика кількість просторово розподілених даних, що зібрані у різнопланових базах, які характеризують якість довкілля та властивості корисних копалин родовищ. Завдання щодо геометризації, моделювання, інтерпретації, комплексного аналізу та практичне використання цих даних є надзвичайно важливим і вимагає комплексного та системного підходу [7].

Використання цифрових технологій у гірничій справі сприяє підвищенню ефективності виробничих процесів, оптимізації ресурсів та забезпеченню безпеки праці. Найпоширенішими інструментами є 3D-моделювання та геоінформаційні системи, які застосовуються для візуалізації родовищ, планування видобутку та моніторингу стану кар'єрів. Значну роль відіграють також системи автоматизованого проєктування та безпілотні літальні апарати (БПЛА), що забезпечують точність геодезичних вимірювань і швидкість отримання даних. В останні роки зростає інтерес до використання штучного інтелекту (ШІ) та цифрових двійників для прогнозування ризиків і управління видобутком у режимі реального часу. Діаграма нижче ілюструє розподіл частки використання ключових цифрових технологій у гірничій галузі,

що відображає сучасні тенденції їх впровадження. На основі джерела [8] було складено рисунок 1, що демонструє частку використання різних цифрових технологій у гірничих роботах. Найбільш поширені технології – 3D-моделювання (25 %) та геоінформаційні системи (20 %). Інші важливі інструменти включають системи автоматизованого проектування, безпілотні системи, штучний інтелект та цифрові двійники, які сприяють ефективному управлінню виробничими процесами.

Відповідно до даних, представлених на рисунку 1, найбільшу частку серед цифрових технологій займають 3D-моделювання (25 %) та геоінформаційні системи (20 %), що підтверджує їхню провідну роль у сучасних процесах планування та управління гірничими роботами.

Практичний досвід впровадження цифрових технологій на відкритих гірничих підприємствах демонструє значні переваги порівняно з традиційними методами. Зокрема, використання тривимірних моделей родовищ дозволяє підвищити точність оцінки запасів корисних копалин на 15–20 % та оптимізувати процеси планування гірничих робіт, що призводить до зниження операційних витрат на 10–15 %. Геоінформаційні системи забезпечують комплексний аналіз геопросторових даних та підтримку прийняття рішень, що сприяє підвищенню ефективності управління гірничими роботами.

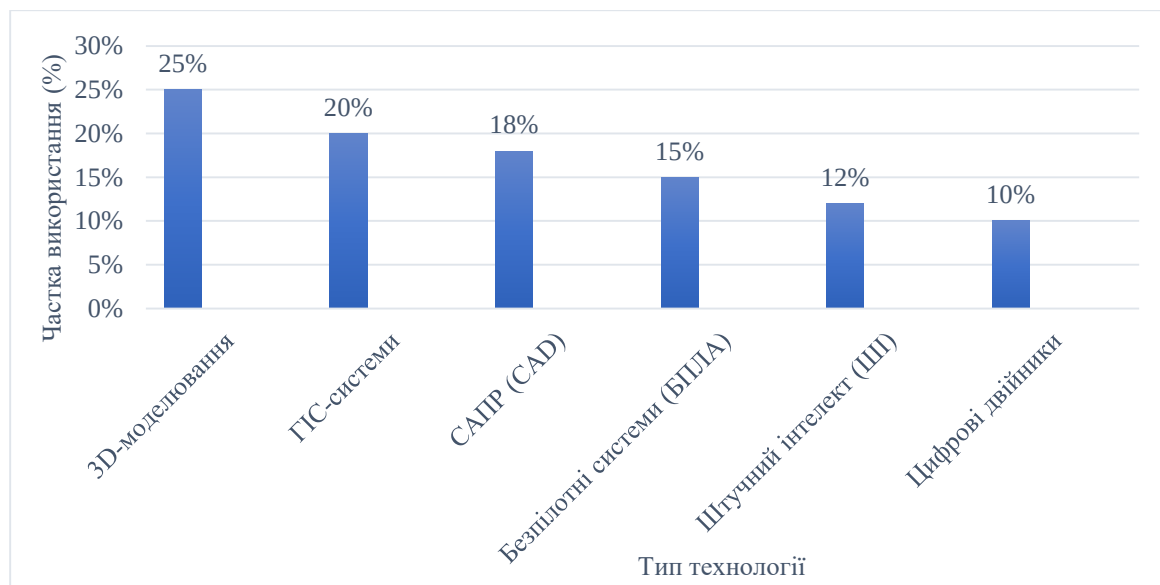


Рис. 1. Використання цифрових технологій у гірничих роботах

Еволюція цифрового моделювання в гірничій справі демонструє значний прогрес від базових математичних методів прогнозування до застосування передових технологічних рішень, таких як тривимірне моделювання, геоінформаційні системи, безпілотні літальні апарати, алгоритми штучного інтелекту та цифрові двійники. Проведений теоретичний аналіз наукової літератури свідчить, що сучасні цифрові інструменти суттєво підвищують ефективність управління виробничими процесами та систем моніторингу, одночасно знижуючи операційні витрати та посилюючи рівень безпеки на підприємствах. Однак залишаються невирішеними певні проблеми, зокрема потреба у значних капіталовкладеннях та складність обробки великомасштабних інформаційних масивів.

Геометризація родовищ з використанням цифрового моделювання є невід'ємною частиною сучасної гірничої галузі, оскільки дозволяє значно покращити ефективність і безпеку виробничих процесів, а також знизити витрати та вплив на навколишнє середовище. Застосування цифрових технологій у гірничих підприємствах охоплює широкий спектр процесів, враховуючи планування, проектування, геолого-маркшейдерські дослідження, управління запасами ресурсів та оптимізацію експлуатації кар'єрів.

Однією з основних переваг цифрового моделювання є можливість інтеграції різноманітних даних, що дозволяє створювати точні 3D-моделі родовищ корисних копалин, а також передбачити потенційні проблеми, пов'язані з гірничими роботами. Застосування таких технологій допомагає виявляти оптимальні шляхи для видобутку ресурсів, знижуючи витрати на транспортування та обробку, а також мінімізуючи вплив на навколишнє середовище. Сучасні системи цифрового моделювання в гірничій галузі використовують інструменти геоінформаційних систем, програмного забезпечення для моделювання гірничих робіт (наприклад, Surpac, Vulcan, MineSight) та технології доповненої реальності. Такі системи дозволяють інтегрувати дані з різних джерел, враховуючи супутникові знімки, геофізичні дослідження, дані з сенсорів на місці та інші технології, що дають можливість створити точні моделі, які відображають реальний стан виробничих процесів.

Серед найбільш визнаних програмних рішень, що активно використовуються в Україні та за кордоном, виокремлюються [9]:

1. Surpac: це програмне забезпечення для геологічного моделювання та планування гірничих робіт. Surpac дозволяє виконувати 3D-моделювання родовищ, аналіз даних буріння, а також планувати видобуток корисних копалин. Використання цього ПЗ дає змогу оптимізувати процеси видобутку, зменшуючи витрати та покращуючи фінансові показники підприємства;

2. MineSight: є комплексним програмним рішенням, що охоплює всі етапи від геологічного моделювання до планування видобутку. Інструменти MineSight підтримують створення моделей рельєфу, підрахунок запасів та симуляцію різних сценаріїв видобутку. Завдяки інтеграції з системами управління даними, MineSight дозволяє здійснювати аналіз даних у реальному часі;

3. GEMS: це програмне забезпечення для геологічного моделювання, що використовується для створення візуалізацій та аналізу родовищ. GEMS має зручний інтерфейс, що дозволяє користувачам легко працювати з великими обсягами геологічних даних, створюючи точні моделі родовищ та прогножуючи результати їх експлуатації.

На рисунку 2 порівнюється ефективність різних програмних рішень у гірничій галузі, зосереджуючи увагу на їхньому впливі на ключові операційні аспекти. Гістограма показує, як кожне програмне забезпечення впливає на такі області, як зниження витрат, підвищення продуктивності та точність прийняття рішень. Програмне забезпечення, яке включає Surpac, MineSight, GEMS, ArcGIS та AutoCAD, оцінюється за його внеском у поліпшення різних процесів у гірничій галузі.

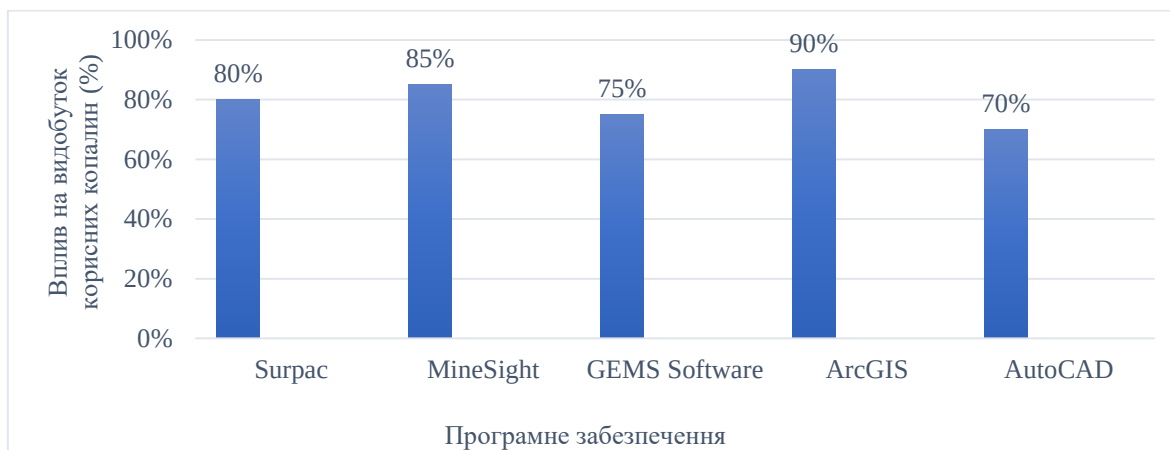


Рис. 2. Вплив програмного забезпечення на гірничі операції

Рисунок 2 показує, що програмне забезпечення, таке як Surpac і MineSight, значно оптимізує видобуток і планування, в той час як ArcGIS та AutoCAD більше сприяють просторовому аналізу та проектуванню інфраструктури. Це підкреслює багатофункціональну роль цих технологій у підвищенні ефективності операцій.

У контексті наукових дискусій особлива увага приділяється питанням точності вихідних даних, інтеграції різнорідних технологічних рішень та економічного обґрунтування впровадження інноваційних підходів. Практичний досвід імплементації цифрових технологій на відкритих гірничих підприємствах Житомирської області підтверджує актуальність розвитку цих методологій з метою підвищення продуктивності виробництва та мінімізації негативного впливу на довкілля. Перспективні напрями розвитку цифрового моделювання пов'язані з подальшою автоматизацією виробничих процесів та вдосконаленням алгоритмів обробки даних у режимі реального часу, що сприятиме підвищенню рівня промислової безпеки та операційної ефективності видобувних робіт. Окрім спеціалізованих програм для моделювання, значну роль у цифровому моделюванні відіграють платформи для обробки та аналізу даних [10]: ArcGIS – ця система ГІС дозволяє здійснювати просторовий аналіз, візуалізацію та управління географічними даними. В умовах відкритих гірничих робіт ArcGIS може використовуватися для аналізу впливу діяльності на навколишнє середовище, моніторингу стану земель та планування транспортних шляхів. Хоча AutoCAD спочатку розроблявся для загального проектування, він також знайшов застосування в гірничій галузі. Завдяки можливостям 2D- і 3D-моделювання, AutoCAD дозволяє створювати детальні плани кар'єрів і інфраструктури підприємств.

Висновки. В цілому аналіз стану розвитку геометризації та цифрового моделювання на відкритих гірничих підприємствах свідчить про впевнений рух галузі у напрямку всебічної цифровізації. Цей процес відбувається в контексті загальної трансформації гірничої промисловості та спрямований на підвищення ефективності, безпеки та екологічності гірничих робіт. Підприємства, які активно впроваджують сучасні

технології геометризації та цифрового моделювання, отримують значні конкурентні переваги через оптимізацію виробничих процесів та зниження операційних витрат.

Аналіз сучасного стану розвитку геометризації та цифрового моделювання на відкритих гірничих підприємствах свідчить про активну трансформацію галузі у напрямі впровадження інноваційних технологій. Ключовими тенденціями є інтеграція різних цифрових технологій у єдині інформаційні системи, розвиток методів збору та обробки геопросторових даних, а також впровадження систем штучного інтелекту та цифрових двійників для оптимізації процесів планування та управління гірничими роботами.

Впровадження сучасних технологій геометризації та цифрового моделювання сприяє підвищенню ефективності використання мінеральних ресурсів, зниженню собівартості видобутку, підвищенню безпеки гірничих робіт та мінімізації їх впливу на довкілля. Це відповідає концепції сталого розвитку гірничодобувної галузі та забезпечує її конкурентоспроможність у сучасних економічних умовах.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка методів інтеграції різних джерел геопросторових даних, вдосконалення алгоритмів моделювання геологічних структур та оптимізації гірничих робіт, а також розвиток систем штучного інтелекту для прогнозування та управління технологічними процесами на відкритих гірничих підприємствах.

References:

1. Kuniyska, M.S., Kryvoruchko, A.O., Skoryk, M.A. et al. (2024), «Heometryzatsiia prostorovoho rozpodilu shkidlyvykh ta korysnykh elementiv v umovakh Zlobytskoho rodovyscha ilmenitu», *Tekhnichna inzheneriia*, Issue 1 (93), pp. 383–391.
2. Xu, S. (2021), «Three-Dimensional Visualization Algorithm Simulation of Construction Management Based on GIS and VR Technology», *Complexity*, No. 1.
3. Śledziowski, J., Terefenko, P., Giza, A. et al. (2022), «Application of unmanned aerial vehicles and image processing techniques in monitoring underwater coastal protection measures», *Remote Sensing*, Vol. 14, Issue 3.
4. Zeba, G., Dabić, M., Čičak, M. et al. (2021), «Technology mining: Artificial intelligence in manufacturing», *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 171.
5. Saniuk, S., Caganova, D. and Saniuk, A. (2023), «Knowledge and skills of industrial employees and managerial staff for the industry 4.0 implementation», *Mobile Networks and Applications*, Vol. 28 (1), pp. 220–230.
6. Hazrathosseini, A. and Afrapoli, A.M. (2023), «The advent of digital twins in surface mining: Its time has finally arrived», *Resources Policy*, Vol. 80.
7. Kryvoruchko, A.O., Kuniyska, M.S., Shyshko, S.M. et al. (2024), «Geometrization, modeling and analysis of the spatial distribution of the main indicators characterizing the quality of crushed stone raw materials within the quarry of PRJSC “TNK “GRANIT”», *Technical Engineering*, Issue 2 (94), pp. 238–248.
8. Hervé, A., Schmitt, C. and Baldegger, R. (2021), «Internationalization and digitalization: Applying digital technologies to the internationalization process of small and medium-sized enterprises», *Technology Innovation Management Review*.
9. Qudrat-Ullah, H., Panthallor, P.N., Qudrat-Ullah, H. and Panthallor, P.N. (2021), «Integrated and Advanced Information Systems in LSOPM Operations», *Operational Sustainability in the Mining Industry: The Case of Large-Scale Open-Pit Mining (LSOPM) Operations*, pp. 31–67.
10. Lee, C.H., Liu, C.L., Trappey, A.J. et al. (2021), «Understanding digital transformation in advanced manufacturing and engineering: A bibliometric analysis, topic modeling and research trend discovery», *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 50.

Куницька Марина Сергіївна – старший викладач кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-2649-0939>.

Наукові інтереси:

- геодезія;
- маркшейдерська справа;
- фотограмметрія.

E-mail: km_kms@ztu.edu.ua.

Поліщук Дмитро Сергійович – здобувач освітньо-наукового ступеня «доктор філософії» Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0007-4257-8037>.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія;
- дистанційне зондування землі.

E-mail: phd184233_pds@student.ztu.edu.ua.

Шапочніков Олег Вячеславович – асистент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- організація та планування гірничих робіт;
- маркшейдерська справа.

E-mail: km_shov@ztu.edu.ua.

Темченко Анатолій Георгійович – доктор технічних наук, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0004-3973-2230>.

Наукові інтереси:

- видобуток та обробка природного каменю;
- гірництво.

Kunyska M.S., Polishchuk D.S., Shapochnikov O.V., Temchenko A.H.

Analysis of the state of geometrization development and digital modeling in open-pit mining enterprises

The article is devoted to the study of modern technologies of geometrization and digital modeling at open-pit mining enterprises. The relevance of the work is due to the requirements for optimizing mining processes, ensuring labor safety and increasing economic efficiency in the exploitation of deposits. The research methodology was a system analysis, statistical data processing and the study of scientific sources on the digitalization of the mining industry. Based on the analysis of literature and practical experience, it was established that the most common technologies are 3D modeling (25 %) and geographic information systems (20 %), which are supplemented by automated design systems (15 %), unmanned systems (15 %), artificial intelligence (15 %) and digital twins (10 %).

It was determined that their integrated application provides an increase in the accuracy of reserve assessment by 15–20 % and a reduction in operating costs by 10–15 %. Key development trends are identified: integration of digital technologies, improvement of methods of collecting and processing geospatial data, introduction of machine learning algorithms for risk prediction. It is proven that modern geometrization methods contribute to the sustainable development of the industry by increasing the efficiency of resource use, reducing the cost of production and minimizing the impact on the environment.

Keywords: geometrization of the deposit; modeling; geographic information systems; digital model.

Стаття надійшла до редакції 02.04.2024.