

# Класифікація втрат облицювального каменю при його видобуванні

Облицювальний камінь – це природний кам'яний матеріал, який видобувається блоками та використовується в архітектурі, будівництві та декоративних цілях. Процес видобування супроводжується втратами, які поділяють на чотири основні категорії: геологічні, технологічні, технічні та організаційні.

Геологічні втрати (35–40%) виникають через природні тріщини, включення, неоднорідність структури. Технологічні втрати (20–25%) пов'язані з методами різання та вилучення блоків. Технічні втрати (15–20%) зумовлені недосконалістю обладнання, а організаційні (10–15%) – через людський фактор та управлінські рішення. Коефіцієнт виходу блоків з масиву коливається від 0,4 до 0,7 залежно від родовища та методів видобування.





# Основні види облицювального каменю

## Гранітні блоки

Надзвичайно міцний матеріал (180–220 МПа) з кристалічною структурою кварцу, польового шпату та слюди. Має високу стійкість до зношування, атмосферних впливів та температурних коливань. Ідеальний для зовнішнього облицювання будівель, сходів, підлог з високим навантаженням та пам'ятників.

## Мармурові плити

Елегантний матеріал з характерним прожилковим малюнком та однорідною текстурою (міцність 80–120 МПа). Легко полірується до дзеркального блиску. Використовується для престижного внутрішнього оздоблення, скульптур та архітектурних елементів. Потребує регулярного догляду для збереження привабливого вигляду.

## Вапнякові блоки

Осадова порода з органоменими включеннями (міцність 40–90 МПа), що формувалась мільйони років. Має пористу структуру та хорошу оброблюваність. Virізняється теплою кольоровою гамою від кремового до золотистого. Використовується для реставрації історичних будівель, облицювання фасадів та виготовлення дрібних архітектурних форм.

## Пісковикові маси

Зерниста структура (міцність 40–100 МПа) з кварцу, кальциту та глинистих мінералів. Має різноманітні відтінки від світло-жовтого до насиченого червоно-коричневого. Добре піддається механічній обробці та різанню. Використовується для ландшафтного дизайну, садових доріжок, декоративних стін та облицювання приватних будинків.





# Специфічні вимоги до облицювального каменю



## Висока однорідність структури

Матеріал повинен демонструвати коефіцієнт варіації щільності не більше 5% при зразках з різних частин блоку. Розмір мінеральних зерен має бути рівномірним (допустима варіація  $\pm 0.5$  мм), що гарантує прогнозовану поведінку при поліруванні та тривалу експлуатацію.



## Мінімальна кількість тріщин

Згідно з ДСТУ Б В.2.7-241, допускається наявність не більше 2 мікротріщин довжиною до 5 мм на 1 м<sup>2</sup> поверхні. Приховані тріщини виявляються ультразвуковим скануванням з частотою 50-55 кГц, причому швидкість проходження хвиль має бути не менше 4500 м/с для граніту та 3500 м/с для мармуру.



## Витриманість геометричних форм

Відхилення від перпендикулярності граней не повинно перевищувати 5 мм на 1 пог. м. Стандартні розміри блоків для експорту: 2.8×1.5×1.5 м, 3.0×1.8×1.8 м та 3.2×2.0×2.0 м з допустимою похибкою  $\pm 25$  мм, що відповідає міжнародним стандартам ISO 8336 та EN 1469.



## Естетичні характеристики

Колірна гама має відповідати еталонним зразкам виробника з допустимим відхиленням за шкалою RAL не більше 2 одиниць. Текстура оцінюється за 7-бальною шкалою виразності, де для преміум-сегменту потрібен показник не менше 5,5 балів. Параметр блиску полірованої поверхні має становити 80-95 GU за шкалою глосметра.

# Геологічні втрати: природні дефекти масиву

## Тектонічні тріщини

Природні розломи в камені з шириною від 0,5 мм до 15 см, що формуються внаслідок тектонічних напруг та зсувів плит земної кори. Ці дислокації часто розташовуються під кутом 60-85° та можуть простягатися на 5-20 м, створюючи зони підвищеної крихкості, які знижують вихід товарних блоків на 25-40%.

## Зони вивітрювання

Поверхневі та приповерхневі ділянки каменю глибиною до 3-5 м, які зазнали фізико-хімічних змін під впливом атмосферних опадів, циклів заморожування-відтавання та сезонних температурних коливань ( $\pm 40^{\circ}\text{C}$ ). Характеризуються зниженою на 30-45% міцністю на стиск, підвищеним водопоглинанням ( $>2\%$ ) та зміненим кольором з характерним окисненням залізовмісних мінералів.

## Включення інших мінералів

Ксеноліти та мінеральні вкраплення розміром від 2 мм до 15 см, переважно піриту, кварцу та польових шпатів з твердістю 6-7 за шкалою Мооса, що контрастують з основною породою (твердість 3-5). Ці аномалії складають до 15% об'єму масиву та спричиняють нерівномірне зношування різального інструменту, збільшуючи витрати на обробку на 20-30%.

## Колірні неоднорідності

Варіації забарвлення в межах одного масиву з коефіцієнтом кольорової дисперсії до 0,25-0,4 за шкалою CIE Lab, що зумовлені локальними змінами мінерального складу та геохімічними процесами. Такі дефекти значно знижують вартість блоків на 30-50% та ускладнюють формування комерційних партій облицювального каменю з однорідними естетичними характеристиками.



# Геологічні втрати: структурні обмеження



## Нерівномірність залягання

Кути падіння порід варіюються від 15° до 45° у межах одного родовища, а товщина продуктивних шарів може змінюватися на 40-60% на відстані лише 100 метрів. Це призводить до зниження коефіцієнта вилучення корисної копалини на 25-30% та збільшує витрати на розкривні роботи в 1,5-2 рази.



## Складна геометрія родовища

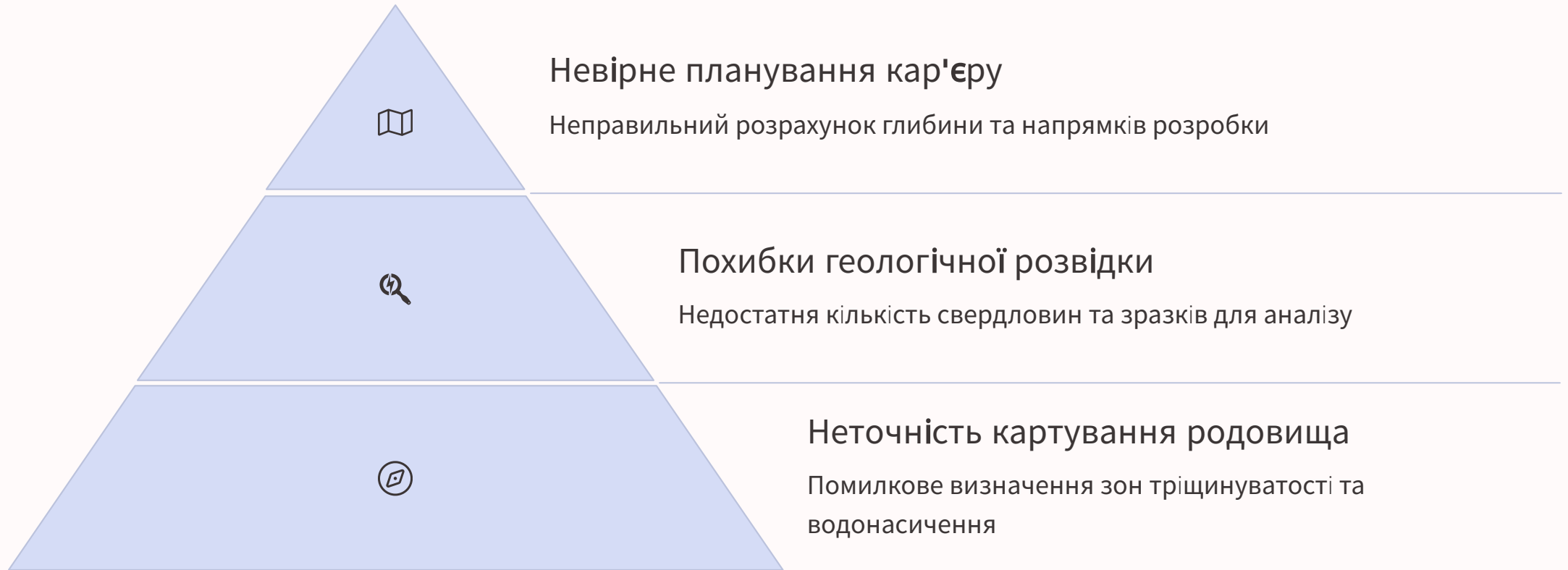
Лінзоподібні та клиноподібні форми покладів зі звивистими контурами ускладнюють планування видобутку блоками стандартного розміру. Через це до 35% потенційно товарного каменю перетворюється на відходи, а продуктивність видобувного обладнання знижується на 20-25% через необхідність частої зміни напрямку різання.



## Переривчастість покладів

Прошарки некондиційного матеріалу товщиною від 0,3 до 1,5 метра зустрічаються через кожні 2-4 метри якісного каменю. Ці включення мають міцність на 40-60% нижчу та підвищену водопоглинальну здатність (>3%), що робить неможливим їх використання для архітектурно-будівельних цілей та збільшує об'єм видобутих відходів до 45-50%.

# Технологічні втрати на етапі розвідки



Технологічні втрати на етапі розвідки становлять 15–20% від загального обсягу втрат при видобутку каменю. Невірне планування кар'єру часто призводить до утворення нестійких бортів, що збільшує ризик обвалів та втрати цінних блоків. При недостатній кількості розвідувальних свердловин (менше 5–6 на гектар) виникають похибки геологічної розвідки, які призводять до помилкової оцінки запасів на 25–30%. Неточності картування, особливо пропуски зон підвищеної тріщинуватості, знижують коефіцієнт видобутку кондиційних блоків з 0,7 до 0,4–0,5, що суттєво впливає на економічну ефективність родовища.





# Технологічні втрати на етапі видобування

С

## Руйнування блоків при вилученні

Механічні пошкодження при відокремленні блоків від масиву через надмірні навантаження (понад 120 МПа) або вібрації з амплітудою більше 2,5 мм, що призводить до втрати 15-20% природного каменю при видобуванні гранітів Житомирського родовища.

Г

## Некоректні технології різання

Застосування алмазно-канатного різання зі швидкістю понад 8 м/с для м'яких вапняків замість оптимальних 4-6 м/с, що збільшує ризик формування мікротріщин на 35% та знижує міцність блоків на 22-25% при подальшій обробці.

Т

## Пошкодження обладнанням

Механічні пошкодження під час переміщення фронтальними навантажувачами CAT-980 без спеціальних захисних подушок, що спричиняє відколи кутів (до 8-12 см) та утворення наскрізних тріщин у 18% блоків габро та лабрадориту.

К

## Неправильний вибір інструменту

Використання бурових коронок з твердосплавними напайками ВК8 замість ВК15 для твердих порід (8-9 за шкалою Мооса), що призводить до передчасного зносу інструменту, відхилення від осі буріння до 5° та перевитрати каменю до 240 кг/м<sup>3</sup> видобутого матеріалу.

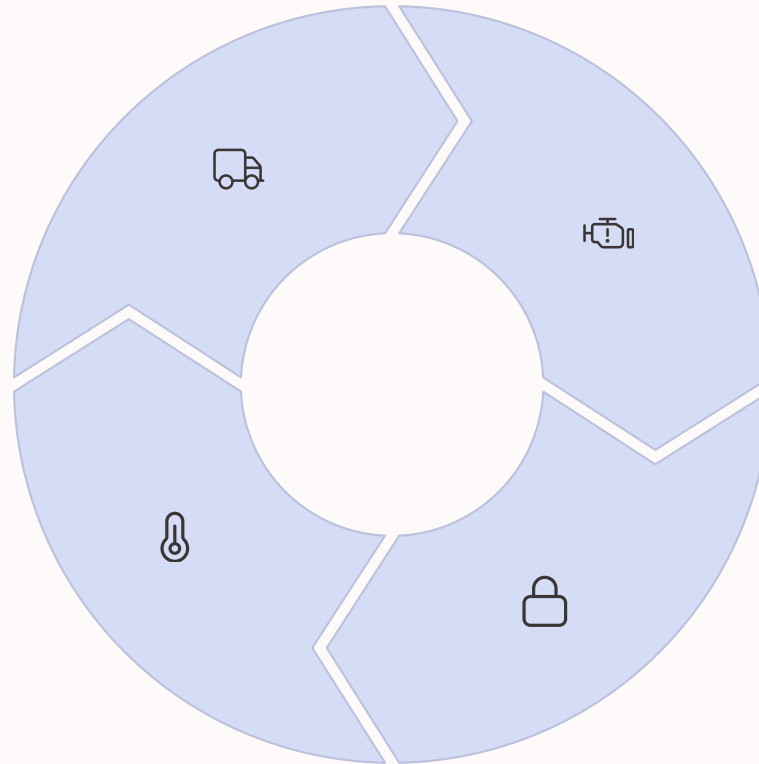
# Технологічні втрати при транспортуванні

## Механічні пошкодження

Сколи, тріщини та відбиті кути (до 15% втрат), що виникають під час вантажно-розвантажувальних робіт з використанням кранів та навантажувачів. Особливо критично для граніту та мармуру.

## Температурні деформації

Розширення та стискання при коливаннях від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  спричиняє мікротріщини у 7% випадків. Особливо чутливі вапняк та пісковик при тривалих міжнародних перевезеннях.



## Удари та струси

Мікротріщини та внутрішні дефекти, що з'являються внаслідок вібрацій на неякісних дорогах. Близько 8-12% блоків зазнають погіршення категорії якості через такі пошкодження.

## Неналежне закріплення

Втрати через недостатню або надмірну фіксацію: тертя між блоками (пошкодження поверхні до 20%), зміщення центру ваги та падіння. Ризик збільшується на 40% при транспортуванні на відстань понад 200 км.



# Економічні втрати: якісні обмеження

1

## Блоки нижчого сорту

Матеріал з естетичними дефектами (плями, кольорові відхилення, нерівномірність текстури), що знижують ринкову вартість на 40-55%

2

## Часткова придатність

Блоки, що придатні лише для виготовлення бруківки, підвіконь чи дрібних елементів замість високомаржинальних облицювальних плит

3

## Зниження ринкової вартості

Втрати прибутку до 70% через неможливість постачання матеріалу для преміум-проектів (готелі 5\*, елітні житлові комплекси, урядові будівлі)

Економічні втрати через якісні обмеження суттєво впливають на рентабельність видобутку облицювального каменю. Блоки нижчого сорту (категорій II та III) реалізуються за цінами на 40-60% нижчими, хоча витрати на їх видобування залишаються на рівні 85-90% від витрат на видобуток першосортних блоків. Часткова придатність гранітних та мармурових блоків з дефектами внутрішньої структури обмежує їх використання до виробів товщиною не менше 30 мм, унеможливаючи створення тонкоформатних плит, які наразі користуються найбільшим попитом. На родовищах Житомирської області ці фактори призводять до зниження прибутковості на 25-35% порівняно з прогнозованими показниками.



# Економічні втрати: структурні обмеження



## Неможливість отримання блоків стандартного розміру

Природні особливості залягання породи (шаруватість, сланцюватість, наявність включень) часто не дозволяють вирізати блоки стандартних комерційних розмірів (2×1×1 м, 2,8×1,5×1,5 м) згідно з ДСТУ Б EN 1467, що знижує їх ринкову вартість на 25-40% та обмежує використання у великомасштабних проєктах.



## Складність подальшої обробки

Приховані дефекти (мікротріщини глибиною 5-15 см, зони підвищеної пористості 15-30%, локальні включення кварцу та піриту) виявляються лише при розпилюванні та поліруванні, призводячи до браку 15-30% слябів та збільшуючи витрати на обробку на 10-18 євро/м<sup>2</sup>.

Структурні обмеження створюють значні економічні втрати при видобуванні облицювального каменю, особливо для граніту та мармуру українських родовищ. Вони зменшують вихід готової продукції на 30-45% порівняно з теоретичними розрахунками, збільшують витрати на обробку на 12-20% та утилізацію відходів (до 40 євро/тонну). За статистикою УАВІ (Української асоціації виробників індустрії каменю), ці фактори призводять до зниження рентабельності виробництва на 18-26% та мають враховуватись при геолого-економічній оцінці родовища.



# Кількісна класифікація втрат за масштабом



## Повні втрати

Блок повністю непридатний для використання через критичні дефекти (наскрізні тріщини, включення м'яких порід) або пошкодження при видобутку. Такі блоки становлять до 30-40% загального обсягу видобутого матеріалу та переробляються на щебінь, бутовий камінь або інші будівельні матеріали, вартість яких у 5-8 разів нижча за ціну облицювального каменю.



## Часткові втрати

Блоки з локальними дефектами (поверхневі тріщини, зони окислення, кольорові аномалії), які потребують обрізки. При обробці таких блоків втрачається від 15% до 50% початкового об'єму. На Житомирських родовищах граніту такі втрати становлять у середньому 25-35% загального обсягу придатних для обробки блоків.



## Потенційні втрати

Блоки високої якості, розташовані у складних геологічних умовах (прикордонні зони, глибинні шари, близькість до водоносних горизонтів). На українських родовищах лабрадориту та габро такі втрати можуть сягати 20-25% загальних запасів. Їх видобуток потребує спеціального обладнання та технологій, що збільшує собівартість на 40-60%.

# Кількісна класифікація втрат: геометричні втрати



## Відхилення від прямокутної форми

Природні тріщини та напластування призводять до формування блоків із кутами відхилення 15–30° від стандартних 90°. При промисловій обробці такі блоки втрачають до 40% об'єму при приведенні до комерційної форми. Згідно з галузевими нормами ДСТУ Б EN 1467:2007, допустиме відхилення становить не більше 5°.



## Нестандартні розміри

Комерційно привабливими вважаються блоки з мінімальними розмірами 1,8×1,0×0,9 м. Блоки менших розмірів (так звані "маломіри") продаються з уцінкою 35–60% від ринкової вартості. На родовищі Капустинського граніту до 25% видобутих блоків мають розміри менші за стандартні, що суттєво знижує рентабельність розробки.



## Складна конфігурація

Блоки трапецієподібної, клиноподібної та ступінчастої форми потребують додаткового розпилювання для отримання прямих кутів. На українських підприємствах при обробці таких блоків середні втрати складають 22–45% від початкового об'єму каменю. Для порівняння, при обробці блоків правильної форми втрати становлять лише 8–12%.



# Кількісна класифікація втрат: об'ємні втрати

## 70%

### Коефіцієнт виходу блоків

Середній показник корисного виходу блоків граніту та мрамору при використанні алмазно-канатної технології різання

## 35000м<sup>3</sup>

### Корисний об'єм родовища

Розрахункова оцінка придатного для експлуатації об'єму Житомирського гранітного родовища з урахуванням тектонічних порушень

## 30%

### Відносні втрати

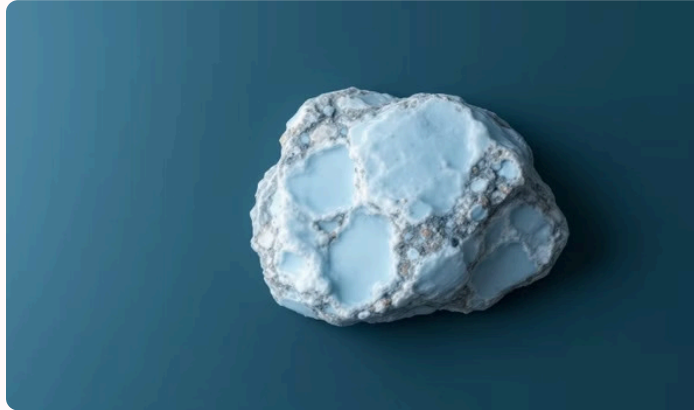
Показник втрат при розробці габро-діабазів в умовах складного залягання породи та наявності тріщинуватості

Об'ємні втрати є критичним показником економічної ефективності розробки родовища облицювального каменю. Коефіцієнт виходу блоків суттєво залежить від обраної технології видобутку та геологічних умов залягання породи. Для родовищ українського кристалічного щита характерна висока тріщинуватість, яка знижує вихід товарних блоків на 5-15%. Корисний об'єм родовища визначається після детального геологічного картування з урахуванням системи природних тріщин, що дозволяє оптимізувати напрямки розвитку фронту гірничих робіт та мінімізувати втрати при відокремленні блоків від масиву.





# Якісна класифікація втрат за видами дефектів



Якісна класифікація втрат облицювального каменю визначається конкретними дефектами, що знижують його комерційну цінність на 15–40%. Тріщинуватість (мікротріщини глибиною понад 2 мм та макротріщини довжиною від 10 см) є критичним дефектом, що може знизити вартість блоку на 60–70% або повністю виключити його з категорії облицювального. Колірні включення (плями ржавчини, хлоритові та серицитові краплі) порушують хроматичну однорідність та знижують декоративність граніту на 30–35%. Структурні неоднорідності (зони катаклазу, пегматитові жили, дайки) погіршують фізико-механічні властивості, зменшуючи міцність на стиск до 20–25%. Мінералогічні домішки (сульфіди, гідроксиди заліза) прискорюють процеси вивітрювання, знижуючи довговічність виробів на 15–30 років у порівнянні з бездефектним матеріалом.



# Якісна класифікація втрат за товарною якістю

## Блоки преміум-класу (8-12% загального видобутку)

Найвища категорія якості з тріщинуватістю менше 0,5 м/м<sup>2</sup> та повною відсутністю колірних включень. Мають максимальну ринкову вартість (від 1200€/м<sup>3</sup>) та використовуються для престижних проектів – елітних інтер'єрів, скульптур та пам'ятників світового значення.

## Стандартні блоки (45-55% загального видобутку)

Матеріал з параметрами тріщинуватості до 1,2 м/м<sup>2</sup> та допустимими колірними відхиленнями до 5% площі. Складають основу комерційного видобутку (650-950€/м<sup>3</sup>) і використовуються для фасадів будівель, підлог та стільниць преміум-сегменту.

## Технічні блоки (20-25% загального видобутку)

Камінь з видимими дефектами: тріщинуватістю до 2,5 м/м<sup>2</sup>, структурними неоднорідностями та мінералогічними домішками, що займають до 15% поверхні. Реалізуються за ціною 350-500€/м<sup>3</sup> для виготовлення бордюрів, сходів та зовнішнього мощення.

## Некондиційна сировина (15-20% загального видобутку)

Матеріал з надмірною тріщинуватістю (понад 2,5 м/м<sup>2</sup>), значними включеннями та структурними дефектами.

Економічна вартість становить 100-250€/м<sup>3</sup>.

Переробляється на щебінь різних фракцій, бруківку, габіони та декоративну крихту для ландшафтного дизайну.



# Спеціальна класифікація для гранітних родовищ

## Тектонічна тріщинуватість

Граніти характеризуються системою природних тріщин з інтенсивністю від 0,5 до 4,5 тріщин на погонний метр. Залежно від орієнтації, виділяють горизонтальні (пластові), вертикальні та діагональні тріщини з розкриттям від 0,1 до 15 мм.

Тектонічна тріщинуватість знижує вихід блоків I сорту на 25–40% та обмежує максимальний розмір монолітів до 2,8×1,5×1,2 м у родовищах середньої тріщинуватості. У високоякісних родовищах коефіцієнт виходу корисної продукції становить 28–32%.

## Зональні включення

У житомирських гранітах зустрічаються ксенолітні включення розміром від 5 см до 1,2 м, представлені переважно біотитовими та амфіболовими скупченнями. Шліроподібні утворення займають до 12% обсягу в окремих ділянках родовищ.

Гранітні масиви часто мають пегматитові жили товщиною 5–30 см, що знижують декоративність на 1–2 категорії за ДСТУ Б В.2.7–59–97. Економічні втрати від зональних включень на престижних об'єктах сягають 15000–20000 грн/м<sup>2</sup> через необхідність підбору додаткового матеріалу.

## Кристалічна структура

Розмір кристалів польового шпату в українських гранітах варіює від 2–5 мм (дрібнозернисті) до 20–45 мм (крупнозернисті). Оптимальна щільність розташування кристалів становить 85–95 кристалів на 10 см<sup>2</sup>.

Граніти з анізотропною орієнтацією кристалів демонструють різницю показників міцності на стиск до 15–20% у різних напрямках (180–240 МПа). Конкурентоспроможність на експортних ринках мають лише родовища з однорідністю кристалічної структури не менше 92% та коефіцієнтом полірування понад 85 од. за блискоміром.



# Спеціальна класифікація для мармурових родовищ



## Прожилки

Тонкі лінії інших мінералів (піриту, графіту, серпентину), що пронизують мармуровий масив у напрямках площин напруження. Золотисті прожилки піриту підвищують декоративність, тоді як графітові можуть створювати структурні слабкості при навантаженні понад 40 МПа. Каррарський мармур з Італії та Діонісос з Греції містять характерні прожилки, які визначають їхню ринкову вартість.



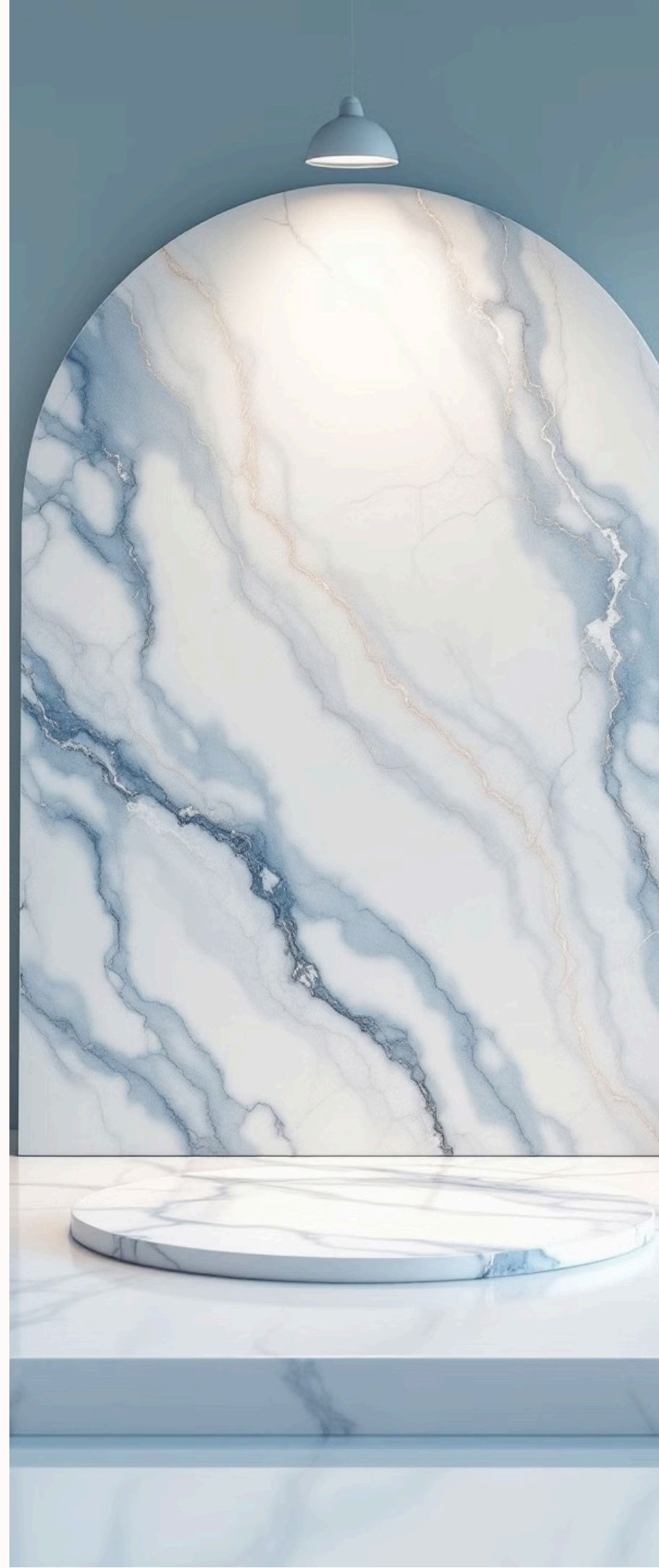
## Колірні переходи

Зміни забарвлення в межах одного мармурового масиву, спричинені варіаціями вмісту оксидів заліза (від 0,1% до 3%), марганцю та органічних домішок. Плавні переходи від білого до сірого або рожевого цінуються в інтер'єрному дизайні, проте створюють складнощі при облицюванні площ понад 200 м<sup>2</sup>. У родовищах Закарпаття такі переходи спостерігаються з інтервалом 0,5-2 метри по вертикалі залягання.



## Кальцитові включення

Концентрації кристалів кальциту розміром від 2 до 15 мм, що відрізняються за щільністю (2,6-2,8 г/см<sup>3</sup>) та орієнтацією від основної маси. Мають різну твердість за шкалою Мооса (від 2,5 до 3,5), що спричиняє нерівномірне стирання при поліруванні. Включення з ромбоєдричними кристалами характерні для мармуру Ruskeala з Карелії та негативно впливають на міцність на стиск, знижуючи її на 15-30%.





# Спеціальна класифікація для вапнякових родовищ

## Пористість

Вапняки характеризуються різним ступенем пористості, що значно впливає на їх фізико-механічні властивості. Коефіцієнт пористості від 0,5% до 35% визначає водопоглинання (0,2-14%), морозостійкість (15-150 циклів) та міцність на стиск (15-180 МПа).

- Мікропористість (пори 0,002-0,1 мм) - впливає на капілярне поглинання вологи
- Макропористість (видимі порожнини 0,1-5 мм) - збільшує водопроникність
- Каверни (порожнини >5 мм) - знижують міцність на 30-45%

## Органогенні включення

Вапняки часто містять палеонтологічні залишки девонського, карбонового та крейдяного періодів. Черепашкові вапняки містять 60-85% карбонату кальцію, що впливає на їх обробку та полірувальність (клас полірування II-IV за шкалою Моса).

- Черепашкові включення (амоніти, молюски) - підвищують декоративність, але створюють мікротріщини
- Коралові структури (розміром 5-150 мм) - утворюють характерний "кораловий" візерунок
- Водоростеві біогерми - формують хвилясту текстуру з показником анізотропії 1,2-1,8

## Седиментаційні особливості

Шаруватість визначає анізотропію вапняків з коефіцієнтом 1,15-2,30. Це критично впливає на технологію видобутку та обробки, зокрема на вибір напрямку різання та допустиме навантаження при монтажі плит (35-120 кг/см<sup>2</sup>).

- Горизонтальна шаруватість (товщина шарів 5-50 см) - оптимальна для видобутку блоків
- Діагональна шаруватість (кут нахилу 15-40°) - ускладнює видобуток, підвищує втрати на 18-25%
- Лінзоподібні включення глини та піску (довжина 10-80 см) - створюють зони концентрації напружень



# Технологічні рішення для мінімізації втрат



## Сучасні методи різання

Впровадження гідроабразивного різання з тиском до 6000 бар та лазерного різання потужністю 5-8 кВт дозволяє досягти точності  $\pm 0,1$  мм та зменшити ширину різку до 1,2 мм, що збільшує вихід готового матеріалу на 12-15% порівняно з традиційними методами. Обладнання від виробників Breton S.p.A та Flow International демонструє найкращі результати при роботі з вапняками середньої твердості.



## Алмазні канатні пили

Системи Pellegrini TD-940 та Dazzini DTV-70 з синтетичними алмазними канатами діаметром 7,3-8,5 мм забезпечують швидкість різання до 8-10 м<sup>2</sup>/год при мінімальній вібрації (до 0,08 мм амплітуди), що запобігає мікротріщинам навіть у вапняках з високим вмістом органогенних включень. Зафіксовано зменшення відходів на 18% порівняно з дисковими пилами.



## GPS-моделювання родовищ

Комплекси Trimble SPS986 з точністю позиціонування до 2 см дозволяють створювати цифрові моделі родовища з урахуванням усіх геологічних особливостей, включаючи седиментаційні шари та природні тріщини. На родовищі "Тернопільський вапняк" впровадження GPS-моделювання підвищило вихід блоків першого сорту на 23% завдяки оптимізації напрямку виїмки відносно природної шаруватості породи.



## 3D-картування

Використання георадарних систем MALA GeoScience з частотою 250-700 МГц у поєднанні з програмним забезпеченням Learfrog Geo дозволяє виявляти приховані каверни та зони підвищеної пористості на глибині до 15 м з роздільною здатністю 5-7 см. На родовищах Хмельницької області ця технологія допомогла збільшити вихід високоякісних облицювальних плит з органогенними включеннями на 28% та зменшити витрати на видобуток некондиційних блоків на 31%.





# Організаційні заходи для мінімізації втрат



## Точне планування

Розробка кварталних і річних планів видобутку з використанням спеціалізованого програмного забезпечення GeoMining Pro, що враховує дані свердловин із кроком 5 м. Це дозволяє визначити оптимальний напрямок фронту робіт з точністю до 95% та знизити втрати на 12-15% порівняно зі стандартними методами планування.



## Попередня геологічна експертиза

Проведення комплексної геофізичної розвідки з використанням георадарів GSSI SIR-4000 та ультразвукового профілювання глибиною до 25 м перед початком розробки нових ділянок. Це дозволяє виявити до 87% прихованих тектонічних порушень та зон підвищеної тріщинуватості, завдяки чому можна скоригувати технологію видобутку або змінити розташування видобувних уступів.



## Навчання персоналу

Впровадження обов'язкової 120-годинної програми підвищення кваліфікації всіх операторів каменерізального обладнання кожні 6 місяців із практичним тестуванням на симуляторах Quarry Master 3000. За статистикою підприємств, що впровадили таку програму, кількість технологічних помилок знижується на 34%, а продуктивність зростає на 27%.

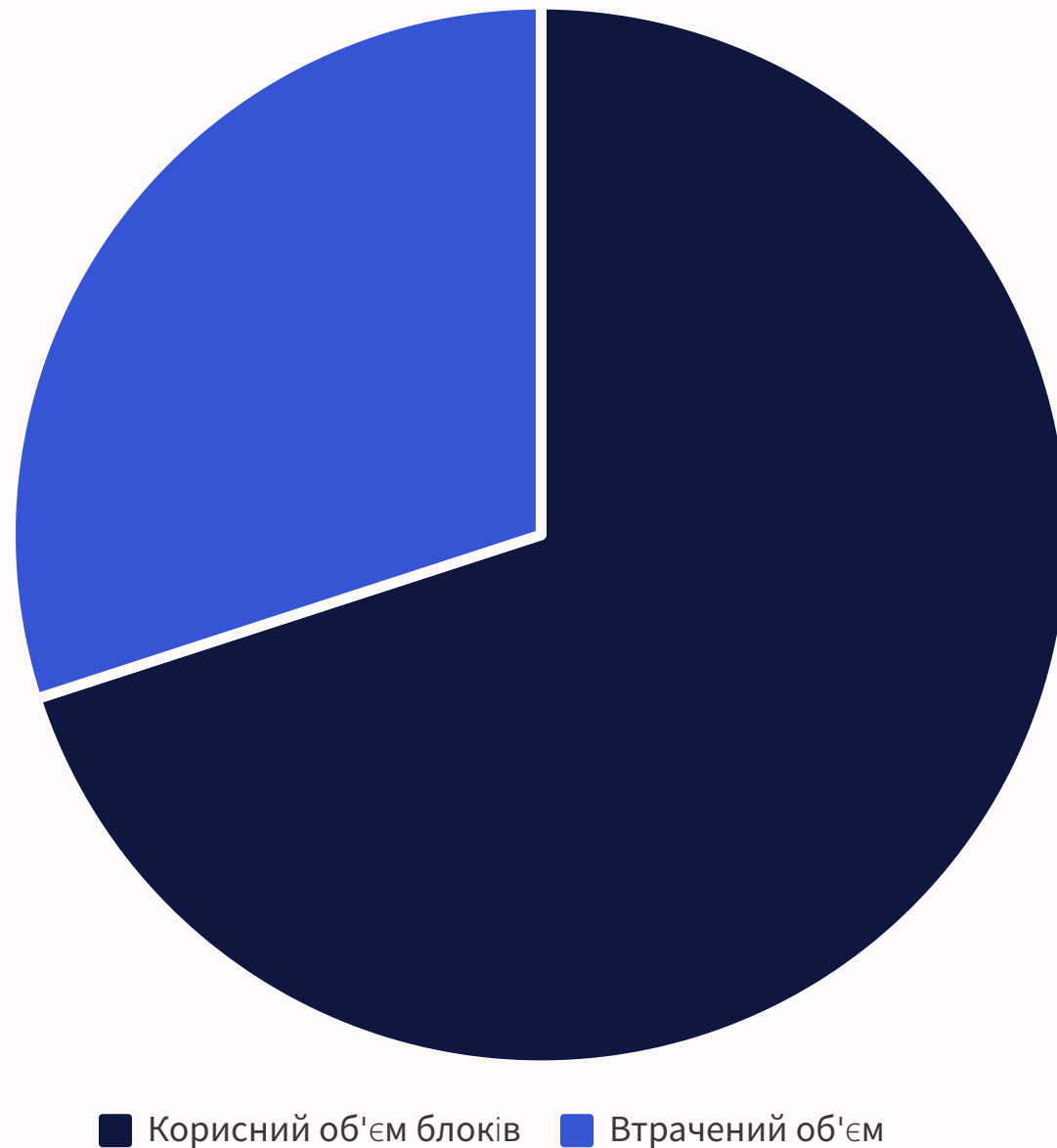


## Контроль якості

Впровадження 4-етапної системи контролю з використанням лазерного сканування BlockQC та ультразвукової дефектоскопії на кожному етапі від видобутку до фінальної обробки. Система включає онлайн-моніторинг із передачею даних до центральної лабораторії, що дозволяє виявляти до 98% дефектів на ранніх стадіях та знижує відсоток браку готової продукції з 12% до 3,5%.



# Практичний приклад: розрахунок втрат гранітного родовища



Для практичного прикладу розглянемо гранітне родовище "Південне" у Житомирській області з наступними характеристиками: загальний об'єм розробленої ділянки родовища становить 50 000 м<sup>3</sup>, з яких корисний об'єм блоків складає 35 000 м<sup>3</sup>, а втрачений об'єм – 15 000 м<sup>3</sup>.

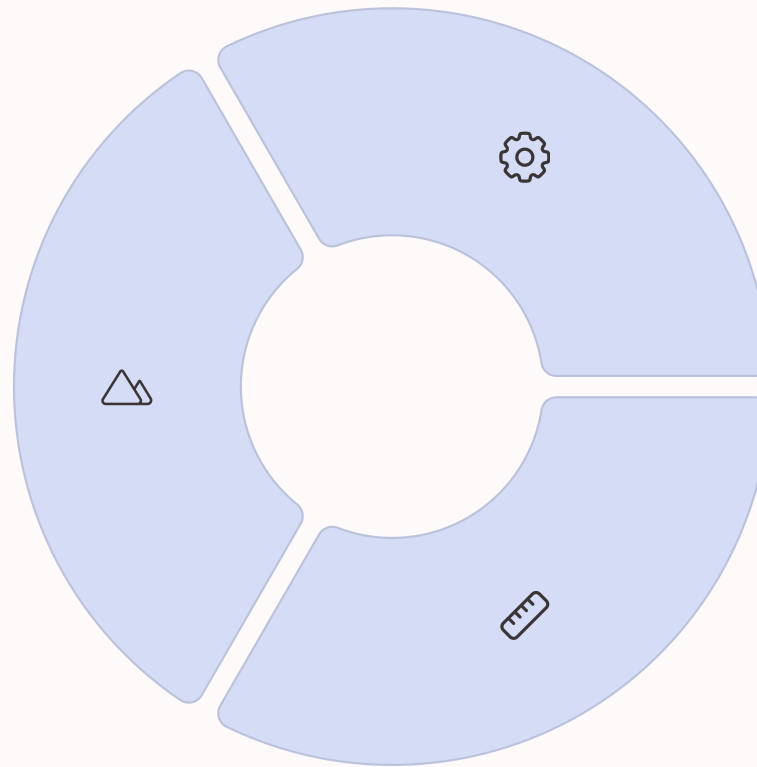
Згідно з детальними розрахунками інженерів-геологів, коефіцієнт корисного виходу для даного родовища становить 70% ( $K_v = (35\,000 / 50\,000) \times 100\%$ ). Абсолютні втрати складають 15 000 м<sup>3</sup>, з яких приблизно 6 000 м<sup>3</sup> (40%) пов'язані з геологічними факторами, 5 250 м<sup>3</sup> (35%) з технологічними причинами, і 3 750 м<sup>3</sup> (25%) спричинені геометричними обмеженнями. Відносні втрати при розробці становлять 30% від загального об'єму ( $\% \text{ втрат} = (15\,000 / 50\,000) \times 100\%$ ).



# Аналіз причин втрат у практичному прикладі

## Геологічні фактори

Природна тріщинуватість гранітного масиву (24,3% втрат) та зони вивітрювання (15,7% втрат) складають 40% від загальних втрат (6000 м<sup>3</sup>). Дослідження показали, що в північній частині родовища щільність тріщин досягає 3,8 на м<sup>2</sup>, а товщина зони вивітрювання – до 1,2 м, що значно знижує якість блоків.



## Технологічні фактори

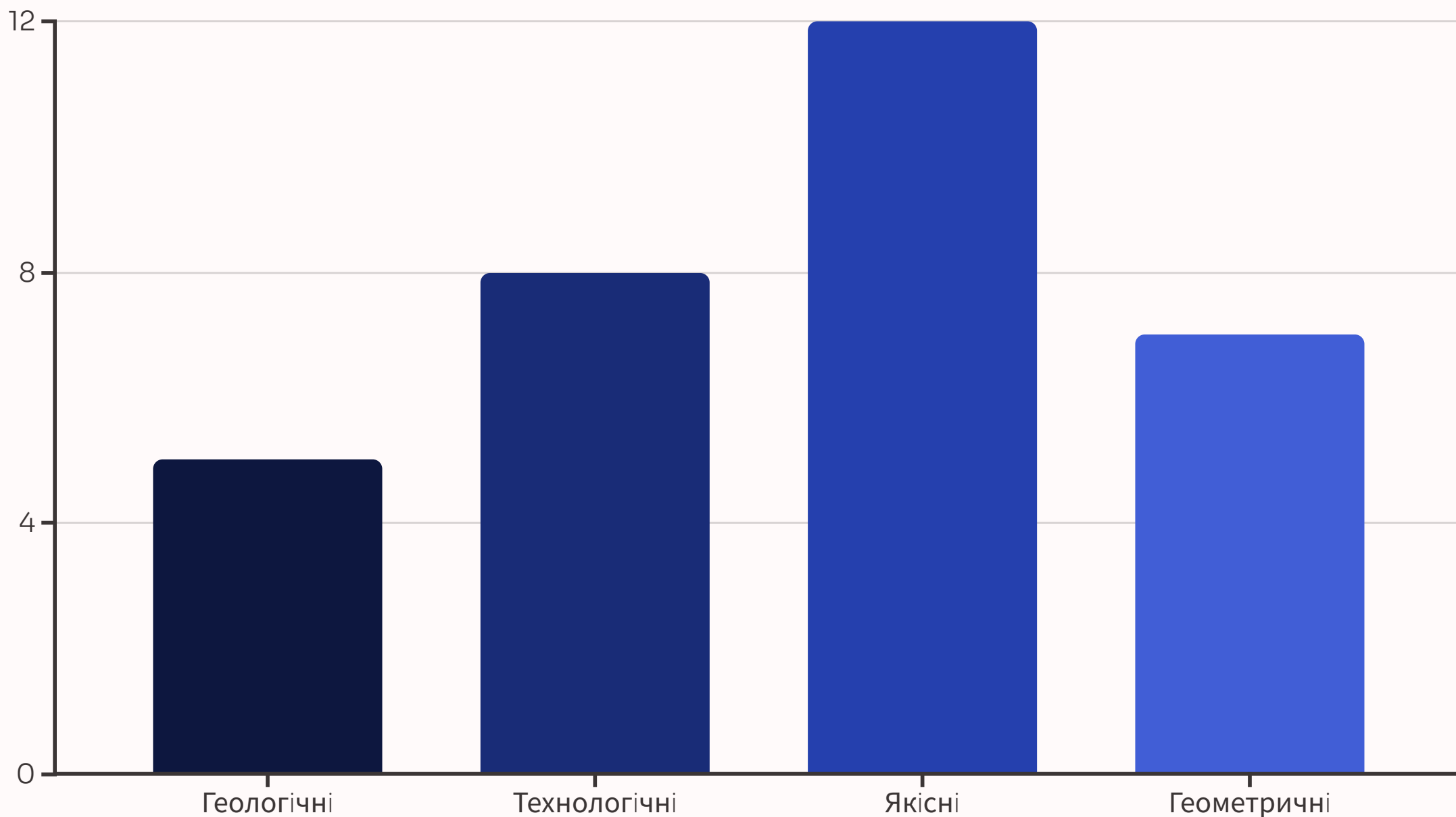
Втрати, пов'язані з технологією видобування та обробки, становлять 35% (5250 м<sup>3</sup>) від загальних втрат. Серед них: пошкодження при бурінні – 12%, при різанні – 10,5%, при транспортуванні – 7%, під час первинної обробки – 5,5%. Використання застарілого обладнання (канатних пил 2008 року випуску) збільшує технологічні втрати на 8%.

## Геометричні фактори

Неможливість отримання блоків стандартного розміру (2,8 × 1,5 × 1,5 м) через особливості залягання породи призводить до 25% втрат (3750 м<sup>3</sup>). При цьому 18% втрат припадає на обрізки кутів, а 7% – на нестандартні фрагменти. На ділянці №3 через карстові утворення неправильної форми втрати досягають 32%.



# Економічні наслідки втрат облицювального каменю



Економічні наслідки втрат облицювального каменю суттєво впливають на рентабельність видобутку. Якісні втрати (12 тис. грн/м<sup>3</sup>) спричиняють найбільші збитки, оскільки знижують клас продукції з преміум (6500–8000 грн/м<sup>2</sup>) до стандартного (3500–4000 грн/м<sup>2</sup>). На родовищі "Корнинське" через дефекти текстури та мікротріщини втрачається до 18% потенційного доходу щорічно.

Технологічні втрати (8 тис. грн/м<sup>3</sup>) включають додаткові витрати на обробку (2,5 тис. грн/м<sup>3</sup>), утилізацію відходів (1,8 тис. грн/м<sup>3</sup>) та збільшення часу виробничого циклу на 30–40%. Використання застарілого обладнання на Житомирському кар'єрі підвищує ці втрати на додаткові 15%.

Геологічні втрати (5 тис. грн/м<sup>3</sup>) змушують збільшувати площу розробки на 25–30%, що вимагає додаткових інвестицій у розвідку (1,2 млн грн на гектар) та інфраструктуру. Геометричні втрати (7 тис. грн/м<sup>3</sup>) знижують вихід стандартних блоків на 22%, що особливо критично при виконанні великих архітектурних замовлень, коли потрібні однорідні плити визначених розмірів.

# Інноваційні підходи до зменшення втрат



## Лазерне сканування

Використання лазерних сканерів LIDAR з точністю до 1 мм дозволяє створювати високоточні тривимірні моделі родовища, що виявляють мікротріщини та внутрішні дефекти на глибині до 0,5 м. На кар'єрах Житомирської області це дозволило знизити геологічні втрати на 15-20% та підвищити вихід блоків першої категорії на 8-12% завдяки оптимізації схем різання відповідно до внутрішньої структури каменю.



## Комп'ютерне моделювання

Спеціалізоване програмне забезпечення "GeoStone Pro" з функцією цифрового двійника дозволяє моделювати процес різання з урахуванням фізико-механічних властивостей конкретних порід каменю. На Головинському родовищі лабрадориту застосування такого моделювання знизило відходи обробки на 23%, зменшило енергоспоживання на 17% та збільшило термін служби алмазного інструменту в середньому на 35%, окупивши інвестиції протягом 8 місяців.



## Роботизовані системи

Впровадження автоматизованих комплексів KUKA Robotics з лазерним наведенням для видобування та канатного різання каменю забезпечує точність позиціонування  $\pm 0,5$  мм. На Коростишівському гранітному кар'єрі це дозволило підвищити коефіцієнт корисного виходу блоків на 27%, скоротити технологічні втрати з 15% до 6%, та знизити трудомісткість робіт на 42%, навіть при роботі з найскладнішими породами з високою анізотропією властивостей.



# Висновки та рекомендації



## Комплексний підхід до оцінки втрат

Необхідно враховувати всі категорії втрат – геологічні (15–20% від загального обсягу), технологічні (до 35% при неоптимальному обладнанні), економічні (10–12% через логістичні проблеми) – для об'єктивної оцінки ефективності розробки родовища. Впровадження системи ERP з модулем управління втратами зменшило загальні втрати на 18% у проєктах на Житомирщині.



## Впровадження сучасних технологій

Використання 3D лазерного сканування родовищ (точність до 2 мм) та канатних пил з алмазним напиленням нового покоління (швидкість різання на 30% вища) дозволяє знизити втрати на 22–25% порівняно з традиційними методами. Комп'ютерні системи моделювання родовищ "GeoQuarry Pro" та "StoneCut" оптимізують розкрій блоків з ефективністю використання до 92% матеріалу.



## Підвищення кваліфікації персоналу

Впровадження системи 120-годинного курсу навчання для операторів спеціалізованого обладнання та щоквартальні практичні тренінги з ISO 9001:2015 зменшили відсоток браку через людський фактор з 14% до 5,8%. Розроблена методика "5S" на виробництві підвищила ефективність робіт на 17% та знизила ризик пошкодження блоків під час транспортування на 24%.



## Постійний моніторинг та аналіз

Впровадження системи щоденного контролю операцій та щотижневого аналізу KPI за методологією Lean Six Sigma виявило приховані джерела втрат на рівні 8–12%. Щомісячний аудит з використанням програмного забезпечення QuarryMetrics та процедура DMAIC дозволили розробити 37 цільових заходів для зменшення втрат, що призвело до загального підвищення видобутку кондиційних блоків на 16,7% за останній рік.

