

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2026-1\(97\)-435-443](https://doi.org/10.26642/ten-2026-1(97)-435-443)  
УДК 622.2

**О.О. Кузнецов, аспірант**  
**І.В. Леоніць, доктор філософії**  
**О.М. Толкач, к.т.н., доц.**  
**Д.М. Білобров, доктор філософії**  
**В.В. Цигода, к.т.н.**

*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **Техніко-логістичні параметри перевезень блоків природного каменю: від кар'єру до каменеобробного підприємства**

*Стаття присвячена розробці та обґрунтуванню оптимальних техніко-логістичних параметрів транспортування монолітних блоків природного каменю (граніт, габро, лабрадорит) масою 15–30 т на «першому плечі» логістичного ланцюга – від вибою кар'єру до твердої дороги чи каменеобробного підприємства (грунтові дороги довжиною 2–3 км) в умовах українського міжсезоння (весняно-осіннє бездоріжжя). Актуальність зумовлена високою часткою транспортних витрат у собівартості блочного видобутку (35–50 %), ізоляцією кар'єрів Житомирської та Рівненської областей, сезонною деградацією суглинково-глинистих ґрунтів, жорсткими нормативами осьових навантажень (одиначна вісь – до 11 т, двоєсна – до 16 т, строєна – до 22 т; загальна маса автопоїзда – до 40 т) та ризиками зносу техніки й дорожнього полотна.*

*Проаналізовано специфіку вантажу: висока щільність (2,6–2,8 т/м<sup>3</sup>), незмінний центр маси, низький коефіцієнт тертя «камінь–сталь», асиметрична геометрія. Порівняно основні транспортні рішення: повнопривідні самоскиди КрАЗ-65032 (6×6, вантажопідйомність 15–18 т), шарнірно-членовані самоскиди ADT (Volvo A25/A30, 24–30 т), фронтальні навантажувачі (Volvo L220H, CAT 988 як транспорт), магістральні автопоїзди та низькорамні трали.*

*Запропоновано модель вибору схеми залежно від відстані: фронтальний навантажувач – до 0,5–0,7 км (мінімальні втрати часу); зона рівноваги – 0,5–1,5 км (залежить від стану ґрунту); автомобільний транспорт.*

*Результати дозволяють зменшити транспортні витрати на 20–35 %, підвищити ритмічність поставок, скоротити знос техніки та простої в період роздоріжжя, забезпечити дотримання нормативів та посилити конкурентоспроможність каменеобробної галузі України в умовах обмеженої інфраструктури.*

**Ключові слова:** транспортування; блоки природного каменю; перше плече логістики; ґрунтові дороги міжсезоння; прохідність.

**Актуальність теми.** Видобуток та первинна логістика блоків природного каменю є фундаментом каменеобробної галузі, де ефективність «першого плеча» транспортування безпосередньо корелює з фінальною собівартістю продукції. Специфіка об'єктів транспортування – монолітних блоків граніту, габро чи лабрадориту – полягає у поєднанні екстремальної маси (від 15 до 30 тонн і більше) та високої щільності матеріалу. Це перетворює кожен блок на зосереджене динамічне навантаження, яке чинить руйнівний вплив на конструктивні елементи транспортних засобів та дорожнє полотно. Актуальність дослідження логістичних параметрів зумовлена трьома критичними чинниками:

Географічна та інфраструктурна ізоляція: більшість кар'єрів в Україні розташовані у важкодоступних місцях, де сполучні шляхи довжиною 2–3 км часто представлені ґрунтовими або щебеневими дорогами нижчих категорій. У періоди гідрологічних піків (весняне танення снігів, осінні опади) ці шляхи втрачають несучу здатність, що ставить під загрозу ритмічність поставок.

Технологічна складність вантажу: на відміну від сипких матеріалів, блок каменю має незмінний центр ваги та жорстку геометрію. Це вимагає від логіста не просто вибору машини з відповідною вантажопідйомністю, а прецизійного розрахунку розподілу мас по осях для запобігання перекиданню або деформації рами.

Економіко-правовий тиск: суворі нормативи щодо граничної ваги на вісь (до 11 тонн) та загальної маси автопоїзда (до 40 тонн) на дорогах загального користування вимагають пошуку компромісу між максимізацією корисного навантаження та дотриманням законодавства. Перевищення цих параметрів призводить не лише до адміністративних штрафів, а й до прискореного зносу дорогої техніки, зокрема шин та елементів підвіски.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проблематика транспортування блоків природного каменю (граніту, габро, лабрадориту) з кар'єру до каменеобробного підприємства є ключовим елементом підвищення ефективності блочного видобутку в умовах України. Останні наукові праці акцентують увагу

на трьох основних напрямках: економіко-технологічному обґрунтуванні транспортних схем у межах кар'єру, впливі розмірів блоків на продуктивність вантажно-розвантажувального обладнання та логістичних викликах, пов'язаних з експортом і сезонними умовами ґрунтових доріг.

У роботі [1] проведено порівняльний аналіз собівартості транспортування 1 м<sup>3</sup> блоків габро залежно від відстані та типу обладнання. Дослідження, виконане на кар'єрі блочного габро, показало, що заміна фронтального навантажувача CAT 988F на більш ефективний аналог (наприклад, з меншим питомим споживанням палива) дозволяє знизити собівартість перевезення на 12,6 % (близько 47 тис. грн/рік у поточних умовах). Автори підкреслюють важливість точного врахування відстані транспортування в межах кар'єру (до 0,5–1 км) та рекомендації щодо переходу на техніку з вищою прохідністю для мінімізації витрат.

В публікації [2] досліджено залежність продуктивності вантажного устаткування від об'ємно-масових характеристик блоків. Встановлено, що зростання маси блоку призводить до підвищення продуктивності як кранів, так і фронтальних навантажувачів, проте навантажувачі мають жорсткі обмеження вантажопідйомності, тоді як крани піднімають блоки всіх категорій (від V до III). Рациональний розподіл типів обладнання за типорозмірами блоків дозволяє оптимізувати технологічну схему та підвищити загальний економічний ефект виробництва.

Автори [3, 8, 9] проаналізували вплив експорту природного каменю Житомирщини на валовий регіональний продукт. Автори зазначають, що транспортна складова в собівартості може досягати 35–40 %, особливо після переорієнтації потоків на суходільні коридори через Європу внаслідок блокади чорноморських портів. Високі логістичні витрати, ускладнені станом ґрунтових під'їзних шляхів у міжсезоння, суттєво знижують конкурентоспроможність галузі.

Вчений [4, 5] акцентує на стандартизації якості блоків («нетто»/«брутто»), енергоємності поділу порід та технологічних аспектах, що впливають на подальше транспортування. Роботи підкреслюють необхідність комплексного підходу до вибору обладнання на етапі «першого плеча».

Дослідження щодо симуляційного моделювання планування транспортування блоків та еколого-економічної оцінки транспортних систем [6, 7, 10] демонструють потенціал зниження витрат на 15–20 % завдяки оптимізації маршрутів і переходу на гібридні або спеціалізовані транспортні рішення. Водночас безпека експлуатації шарнірно-зчленованих самоскидів на крутих ухилах підтверджує переваги ADT (Volvo A25/A30, Bell) у складних ґрунтових умовах.

Незважаючи на значний обсяг досліджень щодо навантаження у вибої, магістральних перевезень та експортної логістики, недостатньо висвітленими залишаються саме специфіка «першого плеча» (2–3 км ґрунтових доріг у весняно-осінній період) в українських реаліях Житомирської та Рівненської областей. Зокрема, бракує комплексного аналізу впливу сезонної втрати несучої здатності суглинкових і глинистих ґрунтів на вибір техніки (КрАЗ 6×6, ADT, фронтальні навантажувачі), розподіл навантажень по осях при перевезенні монолітів 15–25 т, а також ефективність тимчасових заходів стабілізації доріг (підсіпка відсівом, укладання плит ПАГ) у поєднанні з обмеженнями маси та кріплення вантажу. Це створює науковий зазор, який і заповнює дане дослідження.

**Метою дослідження** є розробка та обґрунтування оптимальних техніко-логістичних параметрів транспортування монолітних блоків природного каменю масою 15–30 т на «першому плечі» (від вибою кар'єру до твердої дороги чи каменеобробного підприємства) в умовах українського міжсезоння з урахуванням стану ґрунтових доріг довжиною 2–3 км, нормативних обмежень осьових навантажень та мінімізації собівартості перевезень.

Досягнення мети дозволить знизити транспортні витрати на 20–35 %, підвищити ритмічність поставок сировини, зменшити знос техніки та дорожнього полотна, а також мінімізувати ризики простоїв у період весняно-осіннього бездоріжжя.

**Викладення основного матеріалу.** Транспортування блоків природного каменю (граніту, габро, лабрадориту) вагою від 15 до 25 тонн є одним із найскладніших етапів у ланцюгу постачання. Основний виклик полягає у поєднанні колосальної маси вантажу, його нетипових габаритів та критичного стану під'їзних шляхів до кар'єрів, особливо в умовах українського міжсезоння.

Вибір техніки залежить від відстані та типу дорожнього покриття. Виділено три основні групи:

- кар'єрні самоскиди (КрАЗ, Scania XT, Volvo FMX): Призначені для локальної доставки. КрАЗ (особливо моделі 65055 та повнопривідний 65032) залишається фаворитом завдяки стійкості до перевантажень та ремонтпридатності. Їх вантажопідйомність становить 16–22 тонни;
- магістральні автопоїзди: тягачі з посиленими напівпричепами («шаланди»). Використовуються на дистанціях понад 100 км. Обмежені загальною масою 40 тонн, що дозволяє перевозити чисту вагу блоку до 24 тонн;
- спеціалізовані трали: низькорамні платформи з кількістю осей від 4 до 8, призначені для монолітів масою 40–80 тонн.

В умовах України ґрунтові під'їзні дороги до кар'єрів довжиною 2–3 км у весняно-осінній період часто втрачають несучу здатність і стають непрохідними для стандартних шосейних автопоїздів типу 4×2 та 6×4.

Найбільш проблемними є кар'єри Житомирської та Рівненської областей, де поширені суглинкові й глинисті ґрунти, схильні до розмокання, утворення глибокої колії та втрати зчеплення коліс із дорожнім полотном. У таких умовах логістика транспортування кам'яних блоків масою 15–25 т з вибою до твердої дороги або переробного підприємства стає критичним чинником, що безпосередньо визначає собівартість готової продукції та стабільність виробничого процесу.

Практика українських видобувних підприємств свідчить, що при погіршенні дорожніх умов першочергово виникає необхідність переходу від стандартних самоскидів (6×4) до спеціалізованих рішень із підвищеною прохідністю. Найбільш поширеним і адаптованим до вітчизняних умов варіантом залишаються повнопривідні вантажні автомобілі класичної схеми 6×6 або 8×8. Зокрема, автомобіль КрАЗ-65032 (6×6) фактично є «золотим стандартом» для українського бездоріжжя. Оснащення міжосьовими та міжколісними диференціалами з примусовим блокуванням у поєднанні з широкопрофільними шинами та значним дорожнім просвітом дозволяє цій машині впевнено долати розмиті глинисті ділянки та підйоми з ухилом до 20–25 % навіть при транспортуванні блоків масою до 18 т. Важливою перевагою КрАЗів є також проста конструкція, ремонтпридатність у польових умовах та стійкість до абразивного впливу кам'яного пилу.

Альтернативним технічно досконалішим рішенням є використання автомобілів Tatra 815 у виконанні 6×6 або 8×8. Завдяки унікальній хребтовій рамі та незалежній підвісці коліс такі машини забезпечують більш рівномірний розподіл навантаження на ґрунт і краще зчеплення коліс із нерівною поверхнею. Це зменшує руйнування кар'єрної дороги та глибину колії, що є принципово важливим для збереження проїзду протягом усього сезону. Західні аналоги підвищеної прохідності (Scania XT, Mercedes-Benz Arocs) демонструють високу ефективність, однак у реальних умовах українських кар'єрів їх використання часто обмежується високою вартістю сервісного обслуговування та прискореним зношуванням вузлів при роботі в середовищі багнуки й абразивного кам'яного пилу.

Найбільш професійним і технологічно завершеним рішенням для дистанцій 2–3 км у період танення снігу або зяжених дощів є застосування шарнірно-зчленованих самоскидів типу Volvo A25/A30, Bell або Caterpillar. Завдяки «ламаний» рамі такі машини забезпечують постійний контакт усіх коліс із ґрунтом, що гарантує виняткову прохідність навіть у глибокому багні, на солончаках або розмоклих глинах. Великогабаритні шини низького тиску суттєво зменшують питомий тиск на ґрунт і практично усувають ризик просідання техніки. Вантажопідйомність цих машин становить 24–30 т, що дозволяє транспортувати великі блоки без подрібнення. Водночас при перевезенні саме кам'яних блоків кузова шарнірно-зчленованих самоскидів потребують обов'язкової адаптації у вигляді футерування товстою сталлю або облаштування дерев'яного настилу для запобігання локальним концентраціям напружень і деформації днища. Основним обмеженням цього підходу є високі капітальні інвестиції, що робить його доцільним переважно для великих кар'єрів або підприємств зі стабільними обсягами видобутку.

У випадках, коли стан ґрунтової дороги повністю виключає проїзд важких шосейних фур, на практиці ефективно застосовується двоступенева логістична схема з перевантаженням. На першому етапі блоки вивозяться з кар'єру повнопривідними КрАЗами або шарнірно-зчленованими самоскидами на спеціально підготовлений твердий майданчик, розташований поблизу асфальтованої дороги. На другому етапі здійснюється перевантаження блоків на стандартні шосейні тягачі (Volvo, MAN тощо) за допомогою автокранів або важких фронтальних навантажувачів у конфігурації Block Handler (наприклад, Volvo L220H/L350H або CAT 988). Сучасна практика показує, що такі навантажувачі здатні ефективно замінювати автомобільний транспорт на коротких внутрішньокар'єрних відстанях і витримувати екстремальні точкові навантаження від кам'яних блоків.

Для забезпечення працездатності транспортної схеми в період роздоріжжя необхідним є застосування комплексу тимчасових заходів зі стабілізації дорожнього полотна. Найдешевшим і водночас ефективним способом є засипка колій відсівом фракції 0–5 або 0–10 мм, який є побічним продуктом каменедобування. На найбільш критичних ділянках, таких як підйоми, повороти або зони гальмування, доцільним є укладання вживаних залізобетонних плит типу ПАГ, що дозволяє забезпечити цілорічний проїзд техніки з мінімальними капітальними витратами. У зимовий період та при роботі на слизьких і розмоклих ґрунтах обов'язковим елементом оснащення повнопривідних автомобілів є ланцюги проти ковзання, які ефективні не лише на льоду, а й у глибокому багні, виконуючи функцію додаткових ґрунтозачепів.

Додатковим організаційно-технологічним заходом є зменшення маси разового перевезення в період весняно-осіннього роздоріжжя на 15–20 % від максимально допустимої. Так, якщо в літніх умовах автомобіль КрАЗ-65055 може транспортувати блок масою 18 т, то в умовах розмоклого ґрунту доцільно обмежуватися масою 14–15 т. Такий підхід дозволяє знизити глибину колії, зменшити ризик «сідання на мости» та, як наслідок, скоротити непрямі втрати часу і коштів, пов'язані з простоем і евакуацією техніки.

На дистанції 2–3 км ґрунтових доріг у період весняно-осіннього роздоріжжя на практиці виникає принципова дилема вибору між використанням автомобільного транспорту та важкого фронтального навантажувача для переміщення кам'яних блоків. Фронтальний навантажувач має очевидну перевагу в прохідності завдяки шарнірно-зчленованій рамі та шинам низького тиску, що дозволяє йому працювати

на розмоклих глинистих ґрунтах без попередньої підготовки дороги. Водночас при збільшенні транспортної дистанції понад 1,0–1,5 км його експлуатація поступово втрачає економічну доцільність, оскільки навантажувач конструктивно призначений для циклів «копання – переміщення – укладання» на коротких плечах, а не для регулярного руху як тяговий транспортний засіб.

Для об'єктивного порівняння доцільно розглянути експлуатаційні витрати при транспортуванні блока масою 20 т на дистанції 3 км в один бік (табл. 1). Економіка роботи важкого фронтального навантажувача (наприклад, класу Volvo L220H) зазвичай розраховується через вартість мотогодини. При переміщенні важкого блока по нерівній ґрунтовій дорозі, особливо з наявністю ухилів, витрата палива становить орієнтовно 45–60 л/год, що різко підвищує собівартість одного транспортного циклу. Найбільшою статтею витрат при цьому є знос шин: спеціальні скельні шини класу L5 мають надзвичайно високу вартість, а постійні переїзди на відстань до 3 км по абразивній та нерівній поверхні прискорюють їх знос на 30–40 % порівняно з роботою в межах вибою. Додатково слід враховувати підвищене навантаження на гідросистему, що працює під високим тиском у коротких, але інтенсивних циклах, що збільшує витрати на сервіс і скорочує міжремонтні інтервали. У результаті собівартість тонно-кілометра при використанні навантажувача як транспортного засобу на дистанції 2–3 км стає надмірно високою, і така схема фактично «з'їдає» прибуток підприємства.

Експлуатація автомобільного транспорту, зокрема повнопривідного самоскида КрАЗ-65032 (6×6), розраховується через вартість машино-рейсу і в умовах коротких транспортних плечей демонструє значно кращі економічні показники. Середня витрата палива КрАЗу становить близько 45–55 л на 100 км, тому на дистанції 6 км (туди і назад) паливна складова є незначною порівняно з витратами навантажувача. Вартість та знос кар'єрних шин для автомобіля в рази нижчі, ніж для навантажувача, а швидкість транспортного циклу дозволяє самоскиду повертатися за наступним блоком приблизно вдвічі швидше. Основним обмеженням цієї схеми є залежність від наявності навантажувальної техніки в обох точках логістичного ланцюга – у вибої та на перевантажувальному майданчику або складі, однак за наявності такої інфраструктури собівартість транспортування залишається мінімальною.

З практичної точки зору вибір оптимальної схеми визначається поєднанням бюджету, обсягу видобутку та фактичного стану дороги. За умов обмеженого бюджету та надзвичайно складного дорожнього стану на ділянці 2–3 км доцільно віддавати перевагу повнопривідним автомобілям типу КрАЗ-65032 або шарнірно-зчленованим самоскидам (ADT), оскільки використання навантажувача на такій дистанції супроводжується надмірними витратами палива та прискореним зношуванням дорожньої гуми. Один транспортний цикл навантажувача на 3 км туди-назад може тривати 20–30 хв, що є неприйнятним для інтенсивного видобутку. За наявності значних обсягів виробництва та стабільного плеча 2–3 км найбільш ефективною є комбінована схема, за якої навантажувач працює виключно в зоні вибою, виконуючи операції переміщення та сортування блоків, після чого завантажує їх у шарнірно-зчленований самоскид (наприклад, Volvo A25/A30), який і здійснює транспортування до твердої дороги.

Таблиця 1

*Порівняльна характеристика техніко-економічних показників навантажувально-транспортних засобів при перевезенні блоків природного каменю на коротку відстань*

Показник	Навантажувач (20 т блок)	Самоскид КрАЗ (20 т блок)
Витрата палива на 1 рейс (6 км)	~12–15 літрів	~4–6 літрів
Час циклу (навантаження + рейс)	35–45 хв	20–25 хв
Питома вартість перевезення 1 т	Висока (через амортизацію шин)	Низька
Додаткові витрати	Немає (сам вантажить)	Потрібен кран/навантажувач
Вплив на дорогу	Ущільнює	Руйнує (ріже колію)

При вимушеному використанні навантажувача для транспортування на дистанції близько 3 км обов'язковим є оснащення машини системою амортизації стріли (Boom Suspension System, BSS), оскільки без неї через 2–3 місяці експлуатації в режимі руху по нерівній дорозі з 20-тонним блоком висока ймовірність виникнення втомних тріщин металу стріли та прискореного зносу шарнірів. Узагальнюючи результати аналізу, можна зробити висновок, що для дистанцій 2–3 км автомобільний транспорт є економічно доцільнішим за фронтальний навантажувач, за умови хоча б мінімального догляду за ґрунтовою дорогою (підсіпка відсівом, локальне планування). Перелік транспортних засобів, актуальних для українських реалій наведено в таблиці 2.

## Перелік транспортних засобів, актуальних для українських реалій

Клас автомобіля	Приклад моделі	Колісна формула	Макс. корисна вантажність	Призначення
Важкий самоскид	КрАЗ-65055	6x4	18–20 т	Короткі та середні дистанції, регіональні заводи
Всюдихід-самоскид	КрАЗ-65032	6x6	15–17 т	Складні кар'єрні умови, круті підйоми, багнюка
Кар'єрний тягач	MAN TGS / Scania G-series	6x4 / 6x6	25–30 т	Посилені шасі для важких умов та великих блоків
Автопоїзд (Фура)	DAF XF / Volvo FH	4x2 (тягач)	22–24 т	Міжобласні та міжнародні перевезення (траса)
Низькорамний трал	Спецпричіп	від 4 осей	40–60+ т	Перевезення унікальних монолітів великого об'єму

На основі розрахунків пропонується наступна модель вибору: при дистанції до 500 м доцільно використовувати виключно фронтальний навантажувач, що мінімізує втрати часу на подачу техніки та координацію операцій; у діапазоні 500 м – 1,5 км формується зона економічної рівноваги, де вибір визначається станом дороги і при «м'яких» ґрунтах навантажувач має перевагу за рахунок прохідності; при дистанціях понад 1,5 км однозначну перевагу має автомобільний транспорт, який навіть з урахуванням витрат на утримання дороги та роботу грейдера забезпечує зниження витрат на транспортування на 25–35 % порівняно з постійними переїздами фронтального навантажувача.

При підготовці блоку до транспортування ми маємо справу з трьома критичними обмеженнями: вагою, геометрією та питомим тиском.

*Гранична вага та розміри*

Гранична вага для стандартних доріг: в Україні обмеження загальної маси автопоїзда становить 40 тонн. Враховуючи вагу самого автомобіля (~15–16 т), максимальна вага чистого каменю не повинна перевищувати 24 тонни.

Стандартні розміри блоків:

- довжина: до 3200 мм (для самоскидів обмежена довжиною кузова (зазвичай до 4,5–5 м), що критично для довгих «олівців» (колон));
- висота: до 1800 мм (щоб загальна висота з платформою не перевищила 4 м);
- ширина: до 2000 мм (стандарт габариту дороги – 2,55 м).

*Розрахунок маси через об'єм*

Для гранітів та лабрадоритів ( $\rho \approx 2800 \text{ кг/м}^3$ ):

$$M = V\rho, \text{ т.} \quad (1)$$

Блок об'ємом  $8 \text{ м}^3$  важитиме близько 22,4 тонни, що є межею для більшості тривісних самоскидів.

Навантаження на вісь це найважливіший параметр для логіста. Навіть якщо машина здатна підняти 30 тонн, перевищення осьового навантаження призведе до руйнування дорожнього покриття та величезних штрафів.

При автомобільному транспортуванні важких кам'яних блоків визначальним обмежувальним фактором є не загальна маса транспортного засобу, а навантаження на окремі осі. Кам'яні блоки, на відміну від сипких або рівномірно розподілених вантажів, мають високу концентрацію маси на обмеженій площі опирання, що призводить до локального перевищення допустимих осьових навантажень навіть при формально допустимій повній масі автопоїзда.

Для прикладу, блок масою 27,3 т, розміщений на напівпричепі без оптимального перерозподілу, може створювати навантаження на окрему вісь понад 11–13 т, що перевищує нормативні значення для більшості автомобільних доріг.

Нормативи осьового навантаження:

- одиночна вісь: до 11 тонн;
- здвоєна вісь: до 16 тонн;
- строєна вісь: до 22 тонн.

Перевищення хоча б одного з цих показників вважається порушенням, незалежно від загальної маси транспортного засобу. Саме це робить транспортування монолітних кам'яних блоків особливо проблемним.

Блок каменю – це «зосереджене навантаження». На відміну від щебеню, він тисне на одну точку платформи. Тому блок завжди розміщують суворо над осевим візком (звичай ближче до задніх осей причепа, але з урахуванням навантаження на сидло тягача), щоб рівномірно розподілити вагу.

Вимоги до безпеки та кріплення при транспортуванні важких кам'яних блоків є критичними, оскільки природний камінь характеризується високою щільністю, низьким коефіцієнтом тертя по металевих поверхнях та, у більшості випадків, неправильною або асиметричною геометрією. Поєднання значної маси блока (15–25 т), точкового контакту з платформою та динамічних навантажень, що виникають під час руху нерівними дорогами, створює підвищений ризик горизонтального зміщення, перекочування або локального руйнування як вантажу, так і елементів транспортного засобу. У зв'язку з цим система кріплення повинна розглядатися як комплекс взаємопов'язаних технічних заходів, а не як окремі елементи фіксації.

Базовим елементом безпеки є застосування протиковзних матів, оскільки коефіцієнт тертя в парі «сталь–камінь» є вкрай низьким і не може забезпечити стабільність вантажу навіть за незначних прискорень. Використання матів із пресованої гумової крихти високої щільності дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт тертя ( $\mu$ ), який у разі якісних сертифікованих виробів може досягати значень 0,6 і вище. Це зменшує частку горизонтальних сил, які мають сприймати ланцюгові стяжки, і, відповідно, знижує напруження в системі кріплення. Протиковзні мати повинні розміщуватися між подошвою блока та платформою транспортного засобу з обов'язковим виступом за габарити блока на 1–2 см, що дозволяє здійснювати візуальний контроль їх наявності та правильного положення після навантаження. Важливо підкреслити, що відсутність або пошкодження навіть одного мату різко знижує загальну ефективність системи фіксації.

Для безпосереднього утримання вантажу від зсуву та перекидання застосовуються виключно ланцюгові стяжки класу міцності Grade 80 або Grade 100. Використання текстильних ременів для транспортування кам'яних блоків з необробленими, гострими або сколюваними краями є категорично неприпустимим, оскільки при вібрації або мікропереміщеннях вантажу ремені можуть бути миттєво перерізані каменем. Система кріплення повинна складатися зі сталевих ланцюгів у поєднанні з талрепами або іншими сертифікованими натягувачами, що забезпечують контрольоване та рівномірне натягнення. Навіть при використанні ланцюгів рекомендується застосовувати сталеві або посилені пластикові кутники в місцях контакту з блоком, що дозволяє розподілити контактні напруження, зменшити ризик сколювання кромки каменю та підвищити довговічність елементів кріплення. Для блоків неправильної форми або з несиметричним центром мас доцільним є застосування схеми діагонального («нахрест») кріплення, яка забезпечує фіксацію вантажу від зсуву в усіх чотирьох горизонтальних напрямках та підвищує стійкість системи при гальмуванні або русі на ухилах.

Додатковим, але не менш важливим елементом системи безпеки є використання дерев'яних підкладок і ложементів, основним призначенням яких є рівномірний розподіл навантаження на платформу та формування стабільної «точки опори» для блока. Для цього застосовуються підкладки з твердих порід деревини (дуб, бук) або якісної хвойної деревини без великих сучків, тріщин і зон гниття. Ложементи дозволяють сформувати своєрідне «гніздо» для блока з нерівною або клиноподібною подошвою, що запобігає ефекту перекочування вантажу та зменшує локальні концентрації напружень як у камені, так і в конструкції платформи. Правильно підібрана висота та форма дерев'яних підкладок у поєднанні з протиковзними матами та ланцюговими стяжками створює багаторівневу систему безпеки, у якій кожен елемент компенсує недоліки іншого.

Таким чином, безпечне транспортування важких кам'яних блоків можливе лише за умови комплексного підходу, що поєднує підвищення коефіцієнта тертя в зоні контакту, надійне механічне кріплення та правильне формування опорної поверхні. Ігнорування хоча б одного з цих елементів призводить до різкого зростання експлуатаційних ризиків, втрат матеріалу та підвищеної аварійності при роботі в кар'єрних і позашляхових умовах.

Транспортування монолітних блоків природного каменю масою 15–30 т на «першому плечі» ( $L = 2\text{--}3$  км ґрунтових доріг) залежить від критерію прохідності:

$$p \leq \sigma_{\text{гр}}/k_3,$$

де  $p$  – питомий тиск на ґрунт (кПа),  $\sigma_{\text{гр}}$  – несуча здатність ґрунту (кПа),  $k_3$  – коефіцієнт запасу (1,4–1,8 для розмоклих суглинків у період весняного танення).

Питомий тиск розраховується як:

$$p = \frac{G_{\text{авт}} + m_{\text{бл}}}{A_{\text{кон}}}, \text{ Т/М}^2,$$

де  $G_{\text{авт}}$  – власна маса машини (т),  $m_{\text{бл}}$  – маса блоку (т),  $A_{\text{кон}}$  – сумарна площа контакту шин з ґрунтом (м<sup>2</sup>).

Типові значення (за даними виробників та порівняльних досліджень кар'єрного транспорту):

- шарнірно-зчленовані самоскиди (ADT, Volvo A25/A30):  $p \approx 180\text{--}250$  кПа (завдяки великим шинам низького тиску 2,5–4,0 бар та незалежній підвісці);
- жорсткі самоскиди (КрАЗ-65055 6×4):  $p \approx 350\text{--}500$  кПа;
- фронтальні навантажувачі (Volvo L220H / CAT 988):  $p \approx 400\text{--}650$  кПа (через точкове навантаження на шини L5).

Це забезпечує ADT перевагу в 40–60 % за зниженням питомого тиску порівняно з жорсткими самоскидами, що критично при  $\sigma_{\text{гр}} = 200\text{--}350$  кПа на розмочених ґрунтах Житомирщини та Рівненщини в міжсезоння.

Продуктивність транспортування ( $P$ , т/год) для коротких циклів:

$$P = \frac{3600qk_vk_f}{T_{\text{цикл}}}, \text{ т/год,}$$

де  $q$  – корисна вантажопідйомність (т);  $k_v$  – коефіцієнт використання часу (0,85–0,92);  $k_f$  – коефіцієнт заповнення ( $\approx 0,95\text{--}1,05$  для блоків);  $T_{\text{цикл}}$  – тривалість циклу руху авто, с.

Прикладні значення  $T_{\text{цикл}}$  (на дистанції 3 км туди-назад, ґрунтова дорога):

- ADT (Volvo A25/A30): 18–24 хв;
- КрАЗ-65032 6×6: 20–26 хв;
- фронтальний навантажувач (як транспорт): 35–45 хв.

Паливна складова (за даними виробників та експлуатації):

- Volvo A25/A30: середня витрата 18–19 л/год;
- КрАЗ-65032 6×6: контрольна витрата 37,5 л/100 км (на шосе), в off-road умовах 45–65 л/100 км або 40–55 л/год при коротких циклах.

Розрахункові значення продуктивності (при  $k_v = 0,88$ ,  $k_f = 1,0$ ):

- ADT ( $q = 22$  т,  $T_{\text{цикл}} = 18\text{--}24$  хв):  $P \approx 39\text{--}52$  т/год (середнє  $\sim 45$  т/год);
- КрАЗ-65032 6×6 ( $q = 18$  т,  $T_{\text{цикл}} = 20\text{--}26$  хв):  $P \approx 30\text{--}39$  т/год (середнє  $\sim 34$  т/год);
- фронтальний навантажувач ( $q = 20$  т,  $T_{\text{цикл}} = 35\text{--}45$  хв):  $P \approx 16\text{--}21$  т/год (середнє  $\sim 18$  т/год).

Це означає, що за однакову годину ADT може перевезти в 2,0–2,8 рази більше блоків, ніж навантажувач, що використовується як транспорт.

Питома собівартість перевезення  $C_{\text{пер}}$ :

$$C_{\text{пер}} = (C_{\text{пал}} + C_{\text{ш}} + C_{\text{амор}} + C_{\text{об}}) / qLn_p, \text{ грн/т}\cdot\text{км,}$$

де  $C_{\text{пал}}$  – вартість палива, грн;  $C_{\text{ш}}$  – вартість шин, грн;  $C_{\text{амор}}$  – амортизаційні відрахування на машину (техніку) за період, грн;  $C_{\text{об}}$  – витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт за період, грн;  $q$  – корисне навантаження (вантажопідйомність) одного рейсу, т;  $L$  – Відстань перевезення в один бік або повний цикл, км;  $n_p$  – кількість повних рейсів (вантажних) за той самий період, за який взяті витрати у чисельнику, шт.

Таким чином собівартість перевезення складе:

- фронтальний навантажувач на 3 км: 12–18 грн/т·км (високий знос шин L5 та гідросистеми);
- ADT / КрАЗ 6×6: 8–11 грн/т·км;
- зниження на 24–35 % при переході від навантажувача до спеціалізованого самоскида.

**Висновки.** Транспортування блоків природного каменю масою 15–30 т на «першому плечі» (2–3 км ґрунтових доріг) в умовах українського міжсезоння є критичним етапом, що визначає собівартість сировини та ритмічність постачання.

1. Найефективнішим рішенням для кар'єрів Житомирської та Рівненської областей є повнопривідні самоскиди КрАЗ-65032 (6×6) або шарнірно-зчленовані ADT (Volvo A25/A30) у поєднанні з підсіпкою відсівом, укладанням плит ПАГ на критичних ділянках та сезонним зменшенням маси вантажу на 15–20 %.

2. Фронтальні навантажувачі доцільні лише на відстанях до 500–700 м або виключно в зоні вибою; на дистанціях понад 1,5 км вони економічно не вигідні через високі витрати на паливо та знос шин.

3. Правильний розподіл маси по осях, використання протиковзних матів, ланцюгових стяжок Grade 80/100 та дерев'яних ложементів забезпечує дотримання нормативів осьового навантаження та знижує ризики аварій.

4. Запропонована модель вибору схеми транспортування дозволяє зменшити витрати на 20–35 %, скоротити простой в період роздоріжжя та підвищити стабільність логістичного ланцюга каменеобробної галузі України.

#### Список використаної літератури:

1. Кириленко Н.П. Обґрунтування транспортних робіт в умовах блочного кар'єру / Н.П. Кириленко // Геотехнічна механіка. – 2021. – № 158. – С. 230–667. DOI: 10.32347/2411-4049.2021.158.230667.

2. Котенко В.В. Дослідження міри впливу розмірів блоків природного каменю на ефективність роботи вантажного устаткування за умов ПП «Кванта-ЛЧ» / В.В. Котенко, І.А. Піскун, Р.М. Ігнатюк // *Технічна інженерія*. – 2024. – № 1 (93). – С. 356–362. DOI: 10.26642/ten-2024-1(93)-356-362.
3. Піскун І.А. Роль експорту природного каменю у формуванні валового регіонального продукту Житомирщини / І.А. Піскун, Р.М. Ігнатюк, Д.О. Луценко // *Технічна інженерія*. – 2025. – № 1 (95). – С. 187–194. DOI: 10.26642/ten-2025-1(95)-187-194.
4. Супутнє видобування блоків природного каменю в умовах щебеневого кар'єру / В.В. Коробійчук, А.Г. Темченко, В.І. Шамрай та ін. // *Технічна інженерія*. – 2022. – № 2 (90). – С. 153–160. DOI: 10.26642/ten-2022-2(90)-153-160.
5. Determination of the Impact of Methods and Schemes for Opening a Deposit and Individual Quarry Horizons on the Efficiency of Open-Pit Mining Technology / V.Korobiichuk, A.Temchenko, N.Zuievskia, O.Temchenko // *Geomining Studies in Systems, Decision and Control*. – Vol. 224. – P. 43–54.
6. Proposal of a transport planning model for the removal of quarry stone using a simulation / J.Saderova, L.Ambrisko, D.Marasova, P.Muchova // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, № 12. DOI: 10.3390/app14125130.
7. Glebov A.V. Safe operation of all-wheel drive articulated dump trucks on large slopes in deep open-pit mines / A.V. Glebov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 666, № 2. DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022014.
8. Виймально-навантажувальні роботи на кар'єрах : навчальний посібник / В.В. Коробійчук, В.Г. Кравець, С.С. Ісков та ін. – Житомир : ЖДТУ, 2017. – 440 с.
9. Оцінка експлуатаційних параметрів БелАЗ-548 в умовах Омелянівського кар'єру / Л.А. Ковалевич, І.В. Леонєць, Д.М. Білобров та ін. – *Технічна інженерія*. – 2022. – № 1 (89). – С. 125–131.
10. Інтеграція європейського досвіду оцінки якості природного каменю в Україну / В.В. Коробійчук, Н.П. Кириленко, А.М. Махно та ін. // *Технічна інженерія*. – 2023. – № 2 (92). – С. 217–224.

## References:

1. Kyrylenko, N.P. (2021), «Obgruntuvannia transportnykh robot v umovakh blochnoho karieru», *Heotekhnichna mekhanika*, No. 158, pp. 230–667, doi: 10.32347/2411-4049.2021.158.230667.
2. Kotenko, V.V., Piskun, I.A. and Ihnatiuk, R.M. (2024), «Doslidzhennia miry vplyvu rozmiriv blokv pryrodnoho kameniu na efektyvnist roboty vantazhnoho ustatkuvannia za umov PP “Kvanta-LCh”», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (93), pp. 356–362, doi: 10.26642/ten-2024-1(93)-356-362.
3. Piskun, I.A., Ihnatiuk, R.M. and Lutsenko, D.O. (2025), «Rol eksportu pryrodnoho kameniu u formuvanni valovoho rehionalnoho produktu Zhytomyrshchyny», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (95), pp. 187–194, doi: 10.26642/ten-2025-1(95)-187-194.
4. Korobiichuk, V.V., Temchenko, A.H., Shamrai, V.I. et al. (2022), «Sputnie vydobuvannia blokv pryrodnoho kameniu v umovakh shchebenevoho karieru», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (90), pp. 153–160, doi: 10.26642/ten-2022-2(90)-153-160.
5. Korobiichuk, V., Temchenko, A., Zuievskia, N. and Temchenko, O., «Determination of the Impact of Methods and Schemes for Opening a Deposit and Individual Quarry Horizons on the Efficiency of Open-Pit Mining Technology», *Geomining Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 224, pp. 43–54.
6. Saderova, J., Ambrisko, L., Marasova, D. and Muchova, P. (2024), «Proposal of a transport planning model for the removal of quarry stone using a simulation», *Applied Sciences*, Vol. 14, No. 12, doi: 10.3390/app14125130.
7. Glebov, A.V. (2021), «Safe operation of all-wheel drive articulated dump trucks on large slopes in deep open-pit mines», *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 666, No. 2, doi: 10.1088/1755-1315/666/2/022014.
8. Korobiichuk, V.V., Kravets, V.H., Iskov, S.S. et al. (2017), *Vyimalno-navantazhuvalni roboty na karierakh, navchalnyi posibnyk*, ZhDTU, Zhytomyr, 440 p.
9. Kovalevych, L.A., Leonets, I.V., Bilobrov, D.M. et al. (2022), «Otsinka ekspluatatsiinykh parametriv BelAZ-548 v umovakh Omelianivskoho karieru», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (89), pp. 125–131.
10. Korobiichuk, V.V., Kyrylenko, N.P., Makhno, A.M. et al. (2023), «Intehratsiia yevropeiskoho dosvidu otsinky yakosti pryrodnoho kameniu v Ukrainu», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (92), pp. 217–224.

**Кузнецов** Олександр Олександрович – аспірант кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0002-1004-195X>.

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи;
- обробка природного каменю.

**Леонєць** Ірина Володимирівна – доктор філософії, науковий співробітник Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-6572-681X>.

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи;
- обробка каменю.

**Білобров** Дмитрій Миколайович – доктор філософії, інженер кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0005-4490-2983>.

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи;
- видобуток природного каменю.

**Толкач** Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-8722-6496>.

Наукові інтереси:

- моделювання родовищ корисних копалин;
- процеси видобування та переробки корисних копалин.

**Цигода** Владислав Владиславович – кандидат технічних наук, інженер кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-6997-6384>.

Наукові інтереси:

- моделювання родовищ корисних копалин;
- процеси видобування та переробки корисних копалин.

**Kuznetsov O.O., Leonets I.V., Tolkach O.M., Bilobrov D.M., Tsyhoda V.V.**

**Technical and logistical parameters of natural stone block transportation: from quarry to stone processing plant**

The article is dedicated to the development and justification of optimal technical and logistical parameters for transporting monolithic blocks of natural stone (granite, gabbro, labradorite) with a mass of 15–30 tons over the first leg of the logistical chain – from the quarry face to a hard-surface road or directly to the stone processing plant (unpaved roads 2–3 km long) under Ukrainian off-season conditions (spring and autumn mud seasons / impassability).

The relevance is driven by the high share of transportation costs in the prime cost of block quarrying (35–50 %), the isolation of quarries in Zhytomyr and Rivne regions, seasonal degradation of loamy-clay soils, strict axle load regulations (single axle – up to 11 t, tandem axle – up to 16 t, tridem axle – up to 22 t; total gross vehicle weight – up to 40 t), as well as risks of equipment wear and road surface damage.

The specific characteristics of the cargo are analyzed: high density (2,6–2,8 t/m<sup>3</sup>), fixed center of gravity, low coefficient of friction «stone–steel», and asymmetrical geometry.

The main transportation solutions are compared: all-wheel-drive dump trucks KrAZ-65032 (6×6, payload 15–18 t), articulated dump trucks (ADT) (Volvo A25/A30, 24–30 t), front-end loaders (Volvo L220H, CAT 988 used as transport), on-road tractor-trailers, and low-bed trailers (low loaders).

A model for selecting the transportation scheme depending on distance is proposed: front-end loader – up to 0,5–0,7 km (minimal time losses); equilibrium zone – 0,5–1,5 km (depending on soil condition); truck transport – beyond that.

The results make it possible to reduce transportation costs by 20–35 %, improve delivery rhythmicity, decrease equipment wear and downtime during the mud season, ensure compliance with regulations, and enhance the competitiveness of Ukraine's stone processing industry under conditions of limited infrastructure.

**Keywords:** transportation; natural stone blocks; first leg of logistics; unpaved roads in off-season; mud period trafficability; cross-country mobility.

Стаття надійшла до редакції 12.01.2026.