

© Д.А. Тітов<sup>1</sup>, С.М. Генкуленко<sup>2</sup>, Ю.І. Григор'єв<sup>1</sup>, В.Я. Козаріз<sup>1</sup>, С.І. Балик<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

<sup>2</sup> ТОВ «РУДОМАЙН», Кривий Ріг, Україна

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРИВАЛОГО ВПЛИВУ МАСОВИХ ВИБУХІВ НА ВЛАСТИВОСТІ СКЕЛЬНИХ МАСИВІВ З АДАПТИВНОЮ ІНТЕРПРЕТАЦІЄЮ РЕЗУЛЬТАТІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

© D. Titov<sup>1</sup>, S. Henkulenko<sup>2</sup>, Y. Hryhoriev<sup>1</sup>, V. Kozariz<sup>1</sup>, S. Balyk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

<sup>2</sup> LLC «RUDOMAINE», Kryvyi Rih, Ukraine

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE LONG-TERM IMPACT OF MASS EXPLOSIONS ON THE ROCK MASSES PROPERTIES WITH ADAPTIVE INTERPRETATION OF OBSERVATION RESULTS

**Мета.** Головною метою представленого дослідження є аналіз результатів масових промислових вибухів у кар'єрі, розташованому в одному з центральних районів міста, поруч з другим сумірним йому кар'єром й оточеному іншими промисловими об'єктами, житловими та громадськими будівлями з розвиненою міською інфраструктурою, а також – оцінка еволюції наслідків регулярних вибухів протягом тривалих періодів.

**Методика дослідження** – системне узагальнення даних реєстрації проявів масових вибухів для обґрунтування найбільш раціональної адаптації параметрів підривання гірських порід до встановлених закономірних темпоральних відхилень результатів масових вибухів.

**Результати.** Для перевірки робочої гіпотези, яка полягала в тому, що головним чинником даного процесу є постійне регулярне, тривале вибухове струшування породного масиву, внаслідок якого його природня блочність піддається наростаючому техногенному розвитку в результаті «проробки» первинних структурних тріщин по гранях блоків-окремоностей масиву, було виконано порівняльний аналіз даних спостережень за масовими. Компаративно-каузальний аналіз підтвердив вірність вихідної гіпотези і визначив орієнтовний діапазон відмічених змін та їх закономірність, що значно полегшує пошук адаптивних заходів та коригування параметрів технології масових вибухів у кар'єрі з виключно обмеженими можливостями щодо діапазону варіювання в ньому параметрів вибухової технології внаслідок розташування в центральній частині міста.

**Наукова новизна** статті полягає в комплексному компаративному аналізі довготривалого впливу масових вибухів на зміну фізико-механічних властивостей скельних масивів. Запропонована і експериментально підтверджена авторська гіпотеза, яка пояснює втрату 9–12% енергії масового вибуху тим, що частина енергії вибуху втрачається на переміщення блоків і стирання заповнювача тріщин і тим самим вперше пояснює невідповідність між розрахунковими та фактичними параметрами енергетичних ефектів вибуху. Таким чином, набула подальшого розвитку ідея адаптивного підходу до проектування масових вибухів, яка враховує історичні зміни властивостей масиву та їх вплив на ефективність підривання.

**Практичне значення.** Отримані результати спрощують адаптивне коригування параметрів масового вибуху з урахуванням тривалості експлуатації родовища із застосуванням буропідривних технологій, а також умов розробки масивів гірських порід складної, техногенно зумовленої структури.

**Ключові слова:** кар'єр, породний масив, підривання, гірська порода, свердловинний заряд, масовий вибух.

**Вступ.** Оскільки буро-підривні роботи (БПР) в рудних кар'єрах є основним способом підготовки гірських порід до виймання та найбільш складним і вартісним виробничим процесом, йому приділяється значна увага з боку науковців та раціоналізаторів-практиків. Але, внаслідок надзвичайної розмаїтості практично всіх характеристик об'єкта розробки – порід (мінералогічного складу, фізико-механічних та хімічних властивостей, обводненості, структурної неоднорідності, нестабільності в часі й ін.), варто констатувати відсутність дійсно надійних методів проєктування БПР та прогнозування результатів підривання гірських масивів, особливо – складної структури, до яких належать усі без винятку скельні утворення в межах відводів глибоких кар'єрів, що зумовлюється значною мірою техногенними факторами, серед яких насамперед слід відзначити технологію масових вибухів (МВ), і визначає актуальність дослідження.

**Аналіз останніх публікацій** стосовно наукового супроводу БПР переконливо підтверджує останнє твердження та загальне визнання більшості науковців і фахівців-підривників щодо відсутності та навіть самої можливості єдиного універсального трактування фізичних процесів, якими супроводжується продуктивне руйнування скельних порід за допомогою МВ, що й зумовлює часом доволі суперечливу інтерпретацію окремих проявів відмічених процесів різними дослідниками [1–3]. Однозначно усе це значною мірою ускладнює надійне обґрунтування параметрів МВ, розробку паспортів БПР і – як наслідок – знижує ефективність виконання виробничих завдань і програм, а також адекватність проєктування та планування конкретних геотехнологій, пов'язаних із застосуванням МВ [4, 5].

Ще більшою мірою ускладнюється проблема наукового супроводу розглянутих завдань за умов розташування кар'єру в селитебних й індустріальних районах, особливо – коли проєктований або діючий кар'єр, в якому ведеться науковий супровід геотехнологій, перебуває безпосередньо в центральній частині міста в оточенні логістичних та інженерних мереж не тільки самого кар'єру, але й сусідніх підприємств, інших об'єктів і самого міста, а також забудованих площ та охоронних територій. Необхідно до того ж враховувати й особливі умови забезпечення стійкості різного роду захисних обвалувань та насипів, серед яких типовими для гірничих регіонів є відвали та хвостосховища, насипи залізничні та автошляхів тощо, коли варто враховувати додатково також дослідження щодо стійкості даних споруджень [6].

**Невирішена частина проблеми** полягає загалом у тому, що існуючі методи оцінки енергетичної дії вибуху не зовсім точно відображують дійсну картину розповсюдження ударних хвиль від свердловинного заряду по регулярно структурованому середовищу та взаємодії їх із сукупністю його складових [7, 8].

**Метою дослідження** є каузальний аналіз, спрямований на з'ясування природи відмічених невідповідностей та уточнення механізму енергетичних перетворень у фронті ударних хвиль, що поширюються в блочних породах, якими є майже всі скельні внаслідок їх генезису.

**Викладення матеріалу та результати.** Незважаючи на значну кількість наукових публікацій щодо теоретичних досліджень й експериментальних їх перевірок стосовно БПР за відкритої розробки рудних родовищ, енергетична

ефективність МВ є далеко не стовідсотковою, а тому потребує подальших досліджень, особливо стосовно взаємодії ударних вибухових хвиль з масивом блочних гірських порід, які піддаються техногенним впливам вибухової природи протягом тривалого періоду, для удосконалення відповідної теорії та пошуку технічних рішень, які першочергово стосувалися проблеми мінімізації негативного впливу МВ на міське середовище, безпосередньо оточуюче кар'єри «Південний» та «Північний» (рис. 1). Справа в тому, що початково головна увага в дослідженнях приділялася проблемі розльоту кусків підірваної породи та сейсмічним проявам під час МВ, а також викидам у атмосферу забруднюючих речовин. Але в ході аналізу результатів експериментальних спостережень та реєстрацій і виявилися відмічені вище енергетичні невідповідності, що, власне, й спонукало авторів до більш поглибленого вивчення даного явища.

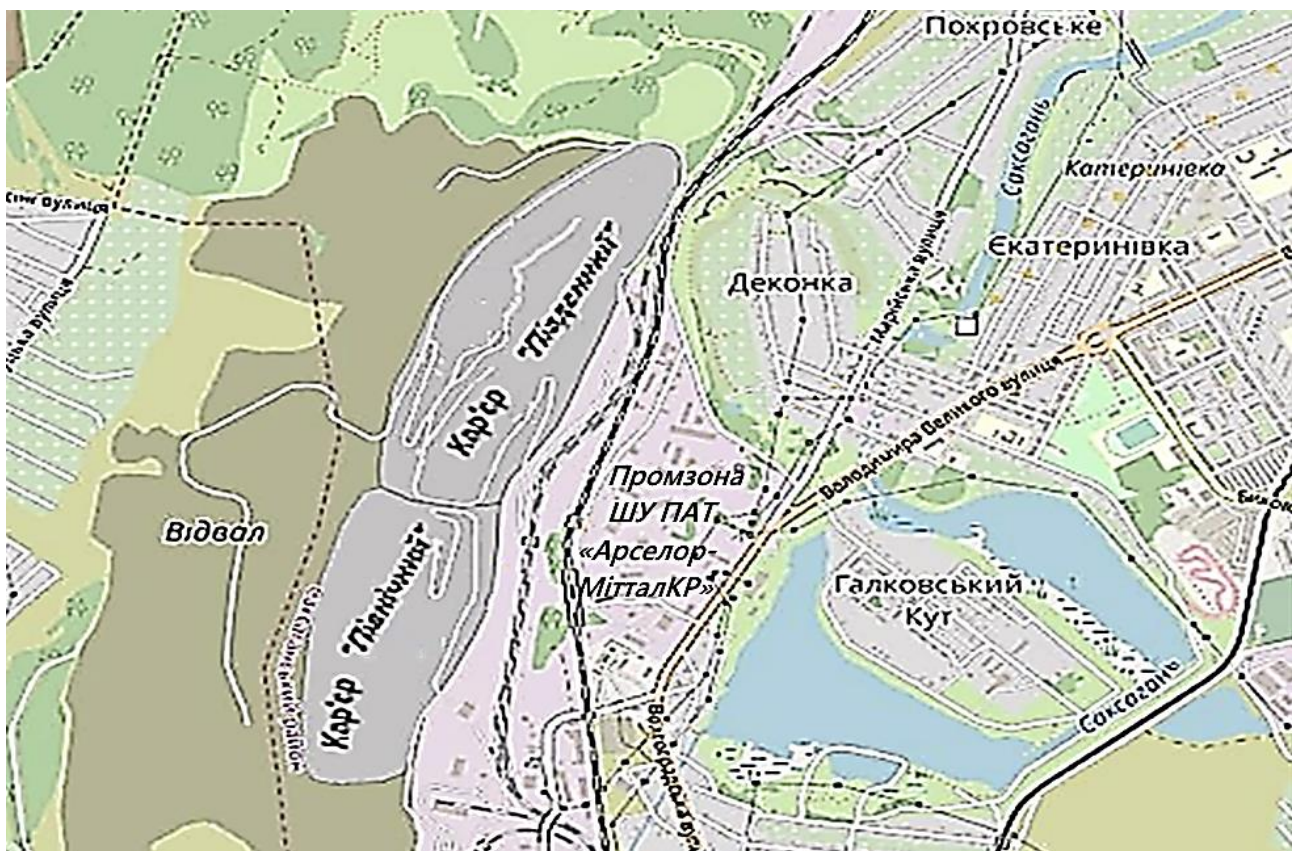


Рис. 1. Кар'єри «Південний» та «Північний», в оточенні об'єктів міської інфраструктури, ШУ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та інших підприємств

У більшості досліджень енергетичні еволюції у фронті ударної хвилі розглядаються здебільшого розрізнено: окремо – при відбитті від вільних поверхонь та заломленні на контакті різних середовищ; окремо – при суперпозиції хвиль від різних джерел; окремо – формування акустичних каналів у шаруватих чи блочних масивах [9, 10]. До того ж варто відзначити вкрай незадовільний стан вивченості переходу хвильової фази вибуху в фугасну.

За даних передумов та цільових вимог дослідження було сформульовано вихідну робочу гіпотезу про те, що, внаслідок постійно зростаючої під дією

періодичних МВ відносної рухливості окремостей масиву, частина «зникаючої» під час його підривання енергії непродуктивно витрачається на перетирання заповнюючого макротріщини матеріалу та переміщень маси блоків: незначних окремо, але доволі суттєвих сумарно. Далі дана гіпотеза задала напрям представлених нижче експериментальних досліджень і наступного аналітичного їх трактування. За цих умов компаративний аналіз результатів експериментального підривання здійснювався шляхом порівняння даних МВ за період з 2010 по 2024 роки, а за вихідні дані послуговували дослідження, виконані тодішнім керівником кар'єру «Північний» А.А. Скачковим [10, 11] при розробці експериментального способу підривання порід методом диференційованого енергонасичення породного масиву. Основою для інженерних розрахунків стало вивчення властивостей схожих за генезисом, складом та станом порід різних кар'єрів Кривбасу, у перетвореннях яких мали місце МВ. Здебільшого – це названі вище межуючі кар'єри «Південний» та «Північний», та (для порівняння) «Першотравневий» ПівніГЗК. Фізико-механічні властивості порід досліджуваних зон визначалися апробованими апаратними і розрахунковими методами [12, 13] (табл. 1).

Таблиця 1

Взаємозв'язок  $f$  та міцності на стискання  $\sigma_{cm}$  паралельно ( $\parallel$ ) і перпендикулярно ( $\perp$ ) шаруватості масиву для зразків №№ 1-8 з кар'єрів «Північний» та «Південний» і 9-12 – «Першотравневий» ПівніГЗК

| $f$ | Міцність зразків на стискання, $\sigma_{cm}$ , кг/см <sup>2</sup> |      |      |      |      |      |      |      | Середнє значення |      | $G_{\max}$ , кг/см <sup>2</sup> |
|-----|-------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|------|---------------------------------|
|     | Орієнтація відносно шаруватості та № зразка                       |      |      |      |      |      |      |      |                  |      |                                 |
|     | (  )                                                              | (⊥)  | (  ) | (⊥)  | (  ) | (⊥)  | (  ) | (⊥)  | (  )             | (⊥)  |                                 |
| 6   | 1                                                                 |      | 2    |      | 3    |      | 4    |      |                  |      |                                 |
|     | 445                                                               | 610  | 416  | 578  | 455  | 637  | 428  | 590  | 436              | 604  | 636                             |
| 10  | 5                                                                 |      | 6    |      | 7    |      | 8    |      |                  |      |                                 |
|     | 725                                                               | 1087 | 645  | 954  | 705  | 1065 | 658  | 980  | 683              | 1022 | 1087                            |
| 14  | 9                                                                 |      | 10   |      | 11   |      | 12   |      |                  |      |                                 |
|     | 910                                                               | 1401 | 905  | 1384 | 944  | 1463 | 901  | 1384 | 915              | 1407 | 1463                            |

Швидкість поздовжньої хвилі  $V_p$  визначали дефектоскопом УКБ-1 прямим прозвучуванням:

$$V_p = \frac{L}{t \cdot 10^6}, \text{ м/с} \quad (1)$$

де  $L$  – довжина зразка, м;  $t$  – час проходження хвилею  $L$ , мкс.

Отримані результати виявили суттєву різницю  $V_p$ , залежно від напрямку руху хвилі відносно шаруватості породи та орієнтації системних тріщин масиву, особливо ступеня техногенної «проробленості» останніх. Враховуючи ж характерну для рудних родовищ зім'ятість породних шарів у складки високих порядків, визначали  $V_p$  і безпосередньо в масивах сейсмотатчиками. В кар'єрі «Північний»  $V_p = 1300$  м/с, а визначена УКБ-1  $V_p = 1308$  м/с (практично співпала).

Швидкість поперечної хвилі (з УКБ-1)  $V_s$ : при затуханні коливань визначали критичний кут  $\alpha_{кр}$ , його синус і саму швидкість –  $V_s = 1550/\sin\alpha_{кр}$ , м/с. Коефіцієнт Пуассона  $\mu$  визначався з виразу (2), модуль Юнга – за формулою (3), а модуль зсуву – за формулою (4):

$$\mu = \frac{(v_p^2 - 2v_s^2)}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (2)$$

$$E = \frac{[v_p^2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu)(1 - 2\mu)]}{1 - \mu} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad (4)$$

Параметри розташування зарядів розраховували за наступною методикою. ЛОПП ( $W_1$ ) перед першим рядом свердловин визначалася з виразу (5):

$$W_1 = H_y \cdot \operatorname{ctg} \alpha + 3, \text{ м} \quad (5)$$

де  $H_y$  - висота уступу, приймалась 10 і 15 м.;  $\alpha=67^\circ$  – кут укосу уступу, град.

Відстань між рядами свердловин  $W_2$  для квадратної сітки зарядів розраховувалась за формулою (6):

$$W_2 = (1.38 - 0.11 \cdot \ln f) \cdot d_{св} \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta \cdot Q_{BP}}{f}}, \text{ м}; \quad (6)$$

Питома витрата ВР визначалась за виразом (7):

$$\rho = (0.06 \cdot f + 10.8) \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta \cdot f^3}{Q_{BP}^3}}, \text{ кг/м}^3 \quad (7)$$

де  $d_{св}$  – діаметр свердловин (0,253 м);  $\Delta$  – щільність заряджання, кг/м<sup>3</sup>, для умов застосування: Анеміксу-70  $\Delta = 1220$ , Грануліту КМ –  $\Delta = 950$ , Емоніту Н –  $\Delta = 1230$ ;  $Q_{BP}$  – теплота вибуху, кДж/кг, для умов застосування: Анеміксу-70 –  $Q_{BP}=3117$ , Грануліту КМ –  $Q_{BP}=3650$ , Емоніту Н –  $Q_{BP} = 3100$ .

Об'єм 1 п.м свердловини розраховувався за виразом (8):

$$p = \frac{\pi \cdot d_{св}^2 \cdot \Delta}{4}, \text{ кг/м} \quad (8)$$

В сухих масивах сильно вивітрілих окислених руд з  $f = 6$ , застосовувався неводостійкий Грануліт КМ з  $\Delta = 850$  кг/м<sup>3</sup> і  $Q_{BP} = 3650$  кДж/кг (табл. 2).

Для всіх ігданітів характерною є неідеальність детонації в зарядах  $d_{св} = 0,25$  м, коли її швидкість  $V_D = 3500$  м/с, за умов теоретичних її значень 4896 м/с, тому ступінь завершеності реакцій у детонаційній хвилі – 0,45. За цих умов  $\rho = 0,54$  кг/м<sup>3</sup>. В сухих породах з  $f = 10$  параметри також розраховано для Грануліту КМ.



Таблиця 2

Розрахункові параметри зарядів ВР на уступах, висотою 10 м

| $f$ | $W_1$ , м | $W_2$ , м | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $m_1$ , кг | $l_n$ | $l_{зар}$ , м |         | $l_{заб}$ , м |         |
|-----|-----------|-----------|----------------------------|------------|-------|---------------|---------|---------------|---------|
|     |           |           |                            |            |       | 1-й ряд       | 2-й ряд | 1-й ряд       | 2-й ряд |
| 6   | 7         | 7         | 0,54                       | 260        | 1,0   | 6,0           | 3,5     | 5,0           | 7,5     |
| 10  | 7         | 6,5       | 0,737                      | 330        | 2,0   | 7,7           | 4,0     | 4,3           | 8,0     |
| 14  | 7         | 6,3       | 1,1935                     | 485        | 2,5   | 7,8           | 4,9     | 4,1           | 7,6     |

Виходячи з практично аналогічних характеристик гірських масивів сусідніх кар'єрів «Північний» та «Південний», ми в своєму компаративному аналізі використали дані щодо підривання блоків, відібраних за ознаками, яким в 2010-2015 рр. найбільшою мірою відповідали масиви даних рудників. На той час вони були локалізовані переважно в першому з них, тому ми наводимо типовий усереднено: блок № 13, що складався з 10 рядів свердловин, з яких було сформовано п'ять пар рядів (рис. 2). Формували заряди з Грануліту КМ масою: парних рядів – 252 кг, непарних – 156 кг. При цьому флангові заряди №№ 26-28, 54-57, 84-87, 114-117, 144-147 в непарних рядах підривалися групами без уповільнення.

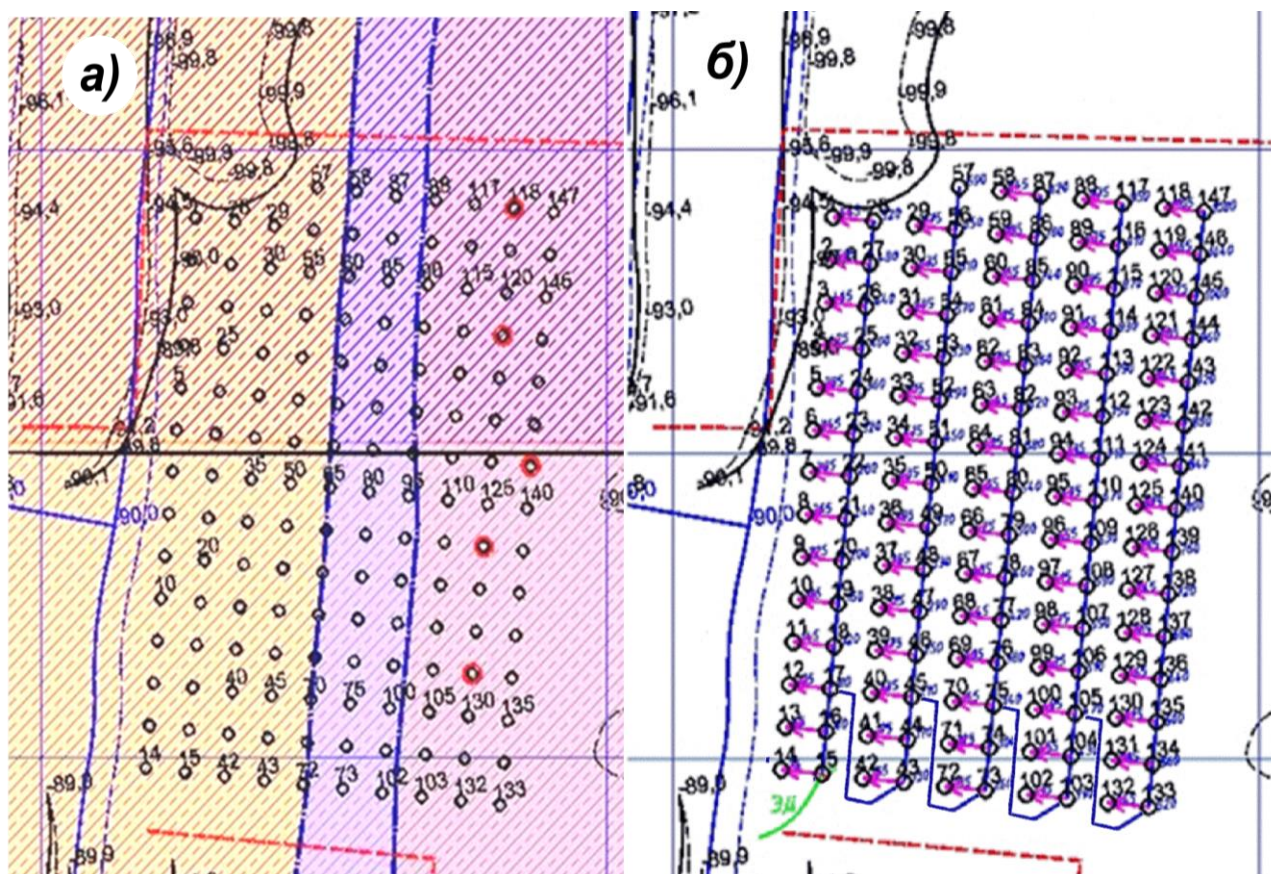


Рис. 2. Проект буріння свердловин для диспозиції на вибух (а) та схема комутації зарядів (б) у блоці № 13 гор. -90/-100 м кар'єру «Північний»

Результати даного експерименту наведено в таблиці 3. В подальшому аналізувалися й порівнювалися уцілілі результати періодичних МВ на близьких за характеристиками масивах за період 2010–2024 рр.

Таблиця 3  
Робочі показники підривання блоку № 13 кар'єру «Північний»

| Найменування                      | Од. вим.          | За технологіями |              |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------|--------------|
|                                   |                   | відомою         | пропонованою |
| Всього ВР грануліт КМ             | кг                | 37000           | 30000        |
| Кількість свердловин              | шт.               | 147             | 147          |
| Обсяг бурових робіт               | м                 | 1640,5          | 1640,5       |
| Об'єм г/маси загальний            | м <sup>3</sup>    | 73000           | 73000        |
| Об'єм г/маси з 1 пм свердловини   | м <sup>3</sup>    | 44,50           | 44,50        |
| Питома витрата ВР на блок         | кг/м <sup>3</sup> | 0,51            | 0,41         |
| Кількість рукавів                 | шт.               | 147             | 147          |
| Кількість води                    | м <sup>3</sup>    | 19,50           | 19,50        |
| Ширина розвалу порід після вибуху | м                 | 5–7             | 4,0          |
| Вихід негабариту                  | %                 | 3,7             | 2,8          |
| Якість проробки підшви уступу     | —                 | без завищень    | без завищень |

Один з останніх аналізованих МВ здійснювався згідно заявки ТОВ «Рудо-майн» на виконання 02.08.2024 року в кар'єрі «Південний» підприємством ТОВ «Бластко майнинг сервіс» відповідно умов угоди № 2303/21 від 23.03.2021 вибухових робіт за паспортом МВ № 44. Підривався блок № 50 гор. +26/+14 м в маркшейдерських осях 32-0 (88 свердловин проектною глибиною 13 м, діаметром 250 мм; сітка буріння – 6,0×6,0 м; довжина блоку – 90 м). Загальна проектна маса ВР на МВ складала 30 000 кг, у тому числі максимальна маса ВР на один ступінь уповільнення – 350 кг. Небезпечна зона: для працівників – 350 м, для обладнання – 150 м, для споруд – 50 м.

Геологічні характеристики блоку № 50 наведено в таблиці 4, робочі показники вибуху – в таблиці 5, проєкт буріння свердловин та виконавчу карту кому-тації вибухової мережі на рис. 3, конструкцію заряду – на рис. 4.

Таблиця 4  
Геологічні характеристики бурового блоку № 50

|   |                             |                                |
|---|-----------------------------|--------------------------------|
| 1 | Розташування                | Західний борт кар'єру          |
| 2 | Стратиграфічний горизонт    | Саксаганська свита             |
| 3 | Індекс                      | PR1sx <sup>1S</sup>            |
| 4 | Найменування гірських порід | Сланці кварц-серицит-хлоритові |
| 5 | Вид порід                   | Розкрив                        |
| 6 | Міцність, $f$               | 10–12                          |
| 7 | Тріщинуватість              | Висока                         |
| 8 | Пористість                  | 7,2–18,5%                      |

Робочі показники підривання блоку № 50

| Показник                  | Од. вим.          | ВР на блок |        | ВМ на блок         |      |
|---------------------------|-------------------|------------|--------|--------------------|------|
|                           |                   | Проект     | Факт   | Найменування       | Факт |
| Анемікс п70/700           | кг                | 123,2      | 123,2  | DetEX MS 500/18    | 176  |
| Анемікс                   | кг                | 30000      | 30000  | DetEX SD 109/8     | 96   |
| Свердловин:               | шт.               | 88         | 88     | Капексдет SD 0/100 | 1    |
| Бурових робіт:            | м                 | 1144,0     | 1144,0 | DetEX SD 67/10     | 8    |
| Підірваної гірничої маси  | м <sup>3</sup>    | 41184      | 40040  |                    |      |
| Об'єм г/маси з 1 п.м.     | м <sup>3</sup>    | 36,0       | 36,0   |                    |      |
| Питомі витрати ВР на блок | кг/м <sup>3</sup> | 0,73       | 0,73   |                    |      |
| Об'єм води гідрозабивки   | м <sup>3</sup>    | 20         | 20     |                    |      |

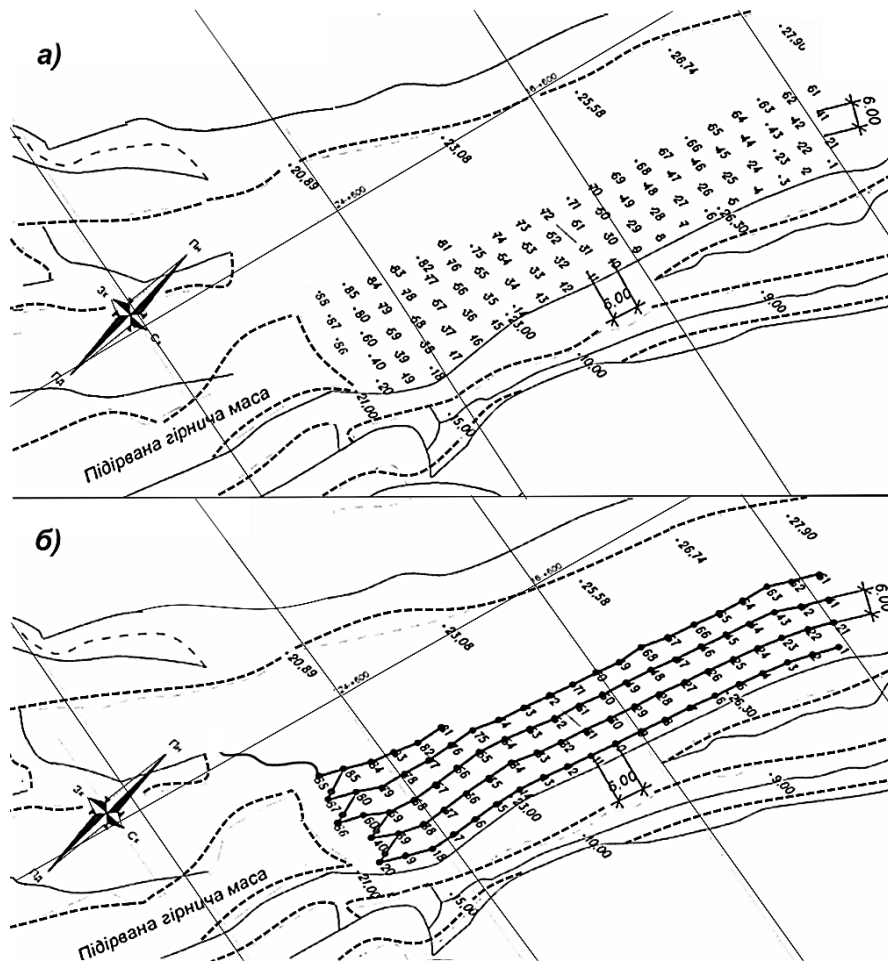


Рис. 3. Проект буріння свердловин для диспозиції на вибух (а) та схема комутації зарядів (б) блоку № 50

**Результати й обговорення.** В ході досліджень було проаналізовано результати понад 300 МВ, здійснених в різних кар'єрах Кривбасу, з яких 79 відбулися в кар'єрах «Північний» та «Південний». В результаті виконаного компаративного аналізу виявилися радикальні відмінності дії вибуху [14] в останніх з них



щодо гранулометричного складу підірваної гірничої маси внаслідок МВ. В таблиці 6 зведено усереднені показники підривання виокремлених в них специфічних за своєю структурою та властивостями скельних порід.

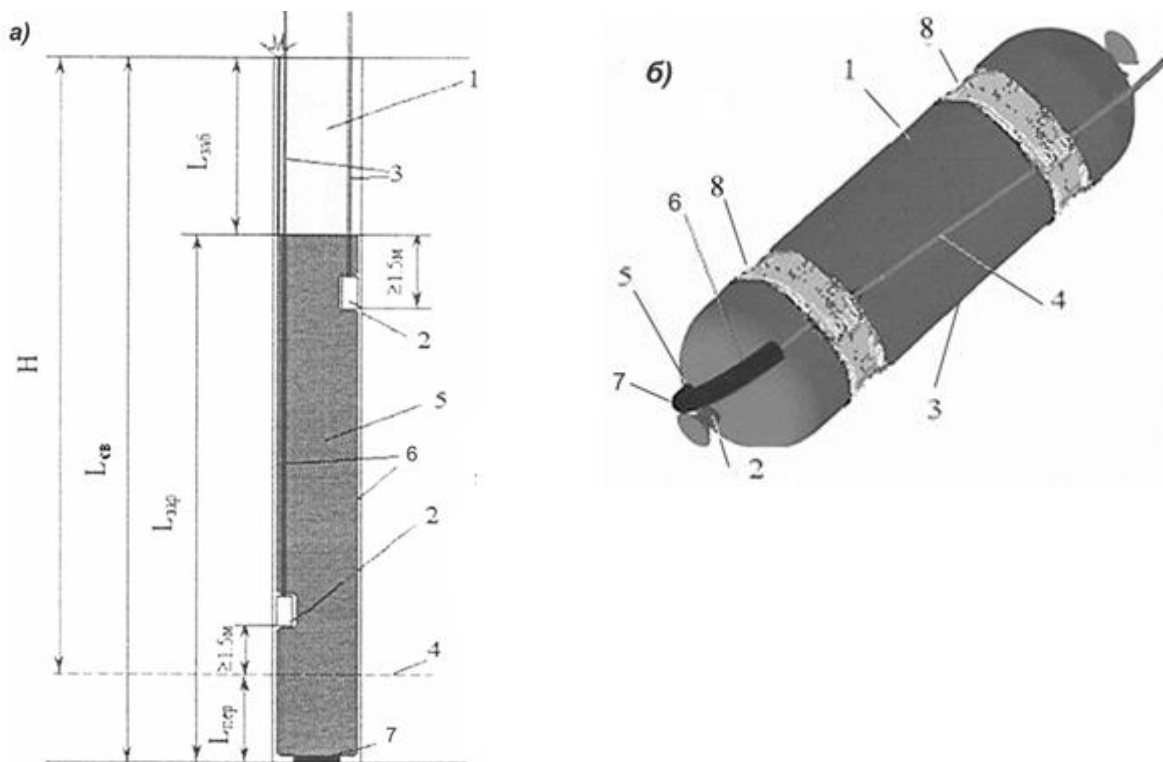


Рис. 4. Конструкція суцільного свердловинного заряду із зарядкою в рукав (а) та патронуваного проміжного детонатора з Анемікс П (б):  
на а): 1 – забивка; 2 – проміжний детонатор; 3 – хвилеводи; 4 – рівень підосви уступу; 5 – ЕВР; 6 – оболонка ППР; 7 – привантаження;  
на б): 1 – патрон; 2 – кліпса; 3 – оболонка; 4 – хвилевід; 5 – кожух; 6 – капсуль-детонатор; 7 – отвір; 8 – хомути.

Таблиця 6

Значення показників ефективності вибухового дроблення порід за критерієм гранулометрії

| Кар'єр           | $f$<br>порід | Вміст фракцій, % у межах крупності, мм |         |         |          |       | $D_{\text{ср.}}, \text{мм}$ |
|------------------|--------------|----------------------------------------|---------|---------|----------|-------|-----------------------------|
|                  |              | 0-200                                  | 201-400 | 401-800 | 801-1200 | >1200 |                             |
| «Першотравневий» | 12-14        | 49,75                                  | 29,7    | 17,91   | 2,37     | 0,27  | 273                         |
| «Ганнівський»    | 12-14        | 49,66                                  | 27,85   | 18,58   | 3,3      | 0,61  | 280                         |
| «Глеюватський»   | 10-14        | 60,8                                   | 21,4    | 16,0    | 1,7      | 0,1   | 248,3                       |
| «Північний»      | 6-14         | 75,8                                   | 22,6    | 1,4     | 0,2      | 0,0   | 178,5                       |
| «Південний»      | 10-12        | 69,0                                   | 29,7    | 1,2     | 0,1      | 0,0   | 153,4                       |

Ми вважаємо, що наведені розробки можуть підвищити ефективність досліджень українських і казахстанських науковців [15] щодо використання лінійного регресійного аналізу та нелінійних методів визначення параметрів для

прогнозних розрахунків якості вибухових робіт, їх оптимізації та мінімізації експлуатаційних витрат на відкритих гірничих роботах.

У дослідженні [16] аналізується вплив на вибухове руйнування породи та її фрагментацію параметрів підривання, але робиться це на невеликих моделях, що значно спрощує і здешевлює експерименти.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Проведений ретроспективний аналіз зміни протягом тривалого періоду стану і фізико-механічних властивостей скельних масивів техногенних родовищ, хоч і вкрай узагальнено, але ж виявляє достатньо виражену тенденцію до невпинного підвищення ступеня формування їхньої блоковості та розкриття обмежуючих блоків макротріщин, що помітно корелює з показниками гранулометрії підірваної гірничої маси. За цих умов каузальний аналіз змін енергетики підривання подібних порід поступово підтверджує наведену в преамбулі статті робочу гіпотезу про роль першопричини усіх трансформацій породних масивів – постійне потужне «струшування» їхніх структурних елементів енергією МВ. Причому, слід враховувати й те, що породи кар'єрів «Північний» та «Південний» піддавалися високодинамічним впливам протягом майже сімдесяти років, як від підземних масових вибухів, так і відкритих, чого з лихвою достатньо для фрагментації масивів на усе більш дрібні окремість, розмежовані тріщинами, або розкритими, або заповненими перетертим мінеральним дріб'язком, що робить їх вразливими до проривів газів.

Враховуючи зазначене, процес вибухового руйнування таких унікальних масивів має адаптуватися шляхом зниження бризантності ВР в свердловинних зарядах, здвигаючи їх дію до більш фугасної, та з урахуванням неминучості часткових непродуктивних втрат енергії МВ внаслідок проривів вибухових газів через низькоопірні тріщини. Але це є доцільним при підриванні лише дрібноблочних масивів. У крупноблочних – навпаки: раціональним може стати застосування більш бризантних ВР.

Розроблені моделі потребують надзвичайно широкого кола уточнень, які стосуються, як проблемних масивів, так і подальшого вдосконалення вибухових технологій. Тому в наступних дослідженнях планується кардинальне коригування вихідних даних для більш точного прогнозування показників МВ, з одного боку, а з іншого – розробки теорії, адекватної розглянутим умовам, та прикладних моделей на її базі.

#### Перелік посилань

1. Rehman, A. U., Emad, M. Z., & Khan, M. U. (2021). Improving the environmental and economic aspects of blasting in surface mining by using stemming plugs. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121(7), 269–377. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1573/2021>
2. Frolov, O.O., & Beltek, M.I. (2022). Investigation of the influence of rock mass fracture on the structural weakening coefficient. *Scientific Edition of the State University «Zhytomyr Polytechnic», Technical Engineering*, 2(90), 183–192. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-183-192](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-183-192)
3. Kovrov, O.S., & Tereshchuk, R.M. (2020). Analysis of approaches to determining the strength characteristics of rocks for predicting the landslide hazard of slopes. *Scientific and Technical Journal «Modern Technologies, Materials and Structures in Construction»*, 1, 63–72. <http://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-1-63-72>

4. Boshoff, D., & Webber-Youngman, R. C. (2011). Testing stemming performance, possible or not? *J. South. Afr. Inst. Min. Metall*, 111, 871–874. [Google Scholar]
5. Fournay, W. L., Barker, D. B., & Holloway, D. C. (1981). Model studies of explosive well stimulation techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18(2), 113–127. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90737-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90737-3)
6. Azarian, V., Lutsenko, S., Zhukov, S., Skachkov, A., Zaiarskyi, R., & Titov, D. (2020). Applied scientific and systemic problems of the related ore-dressing plants interaction in the event of decommissioning the massif that separates their quarries. *Mining of Mineral Deposits*, 14(1), 1–10. <https://doi.org/10.33271/mining14.01.001>
7. Minieiev, S. (2021). Justification of the parameters for safe blasting of floor rocks in the roadway driven through the hazardous by outbursts sandstones. *Geo-Technical Mechanics*, 159, 11–29. <https://doi.org/10.15407/geotm2021.159.011>
8. Beltek, M.I. & Frolov, O.O. (2023). Determination of the influence of the degree of fracturing of the rock mass on the index of reduction of its strength. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 74, 7–18. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.007>
9. Tymoshchuk V. & Tymoshchuk Y. (2023). Mathematical modeling of the geomechanical state of a manufactured rock mass under the conditions of seismic loading. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 74, 163–179. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.163>
10. Скачков, А.А. (2018). Просторова спрямованість енергії комбінованих свердловинних зарядів за диференційованого енергонасичення масиву порід. *Збірник наукових праць НГУ*, 55, 88–96. <http://znp.nmu.org.ua/pdf/2018/55/10.pdf><http://znp.nmu.org.ua/pdf/2018/55/10.pdf>
11. Скачков, А. А., & Жуков, С. О. (2016). Формування напруженого стану приконтурної зони уступу. *Вісник Криворізького національного університету*, (43), 147–153. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-57>
12. Dortman, N. B. (1984). *Fizicheskie svoystva gornykh porod i poleznykh iskopaemykh (petrofizika). Spravochnik geofizika (2nd ed., revised and enlarged)*. Nedra.
13. Lomtadze, V. D. (1990). *Fiziko-mekhanicheskie svoystva gornykh porod. Metody laboratornykh issledovaniy*. Nedra.
14. Malykh, D., Eremenko, G., & Titov, D. (2024). Parametric evolutions of explosive fracture zones in the explosion of series of blasthole charges with a complex structure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012083. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012083>
15. Hryhoriev, Y., Lutsenko, S., Shvets, Y., Kuttybayev, A., & Mukhamedyarova, N. (2024). Predictive calculation of blasting quality as a tool for estimation of production cost and investment attractiveness of a mineral deposit development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1415(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012027>
16. Shi, X., Zhang, Z., Qiu, X., & Luo, Z. (2023). Experiment Study of Stemming Length and Stemming Material Impact on Rock Fragmentation and Dynamic Strain. *Sustainability*, 15(17), 13024. <https://doi.org/10.3390/su151713024>

### ABSTRACT

**Purpose** of the presented study is to analyze the results of mass industrial explosions in the open-pit located in one of the central districts of the city, surrounded by other industrial facilities, residential and public buildings with developed urban infrastructure, as well as to assess the evolution of the consequences of regular explosions over long periods.

**The methodology** is a systematic generalization of data on the registration of manifestations of mass explosions to substantiate the most rational adaptation of rock blasting parameters to the established regular temporal deviations of the results of mass explosions.

**Findings.** To verify the working hypothesis, that the main factor of this process is the constant regular, long-term explosive shaking of the rock massif, as a result of which its natural blockiness is subjected to increasing technogenic development as a result of the "working through" of primary structural cracks along the faces of the blocks-individuals of the massif, a comparative analysis of the mass observation data was performed. The comparative causal analysis confirmed the accuracy of the initial hypothesis and determined the approximate range of the observed changes and their regularity, which greatly facilitates the search for adaptive measures and adjustment of the parameters of the mass explosion technology in a quarry with extremely limited possibilities for the range of variation of the parameters of the explosive technology in it due to its location in the central part of the city.

**The originality** of the article lies in the comprehensive comparative analysis of the long-term impact of mass explosions on the change in the physical and mechanical properties of rock massifs. The author's hypothesis is proposed and experimentally confirmed, which explains the loss of 9–12% of the energy of a mass explosion by the fact that part of the explosion energy is lost to the movement of blocks and the abrasion of the crack filler, and thus for the first time explains the discrepancy between the calculated and actual parameters of the energy effects of the explosion. Thus, the idea of an adaptive approach to the design of mass explosions, which takes into account historical changes in the properties of the massif and their impact on the effectiveness of the blasting, has been further developed.

**Practical implementation.** The obtained results facilitate the adaptive adjustment of mass blasting parameters, taking into account the duration of mineral deposit exploitation using drilling and blasting technologies, as well as the geological conditions associated with rock masses exhibiting complex, technogenically altered structural configurations.

**Keywords:** *open-pit, rock massif, blasting; rock, borehole charge, mass explosion.*