ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 622.235.5:550.34:504.064 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.007

© А.Л. Ган[1,2], В.В. Бойко[2], В.В. Коробійчук[2,3], Т.В. Хлевнюк[2], О.В. Ган[1,2], Д.М. Білобров[3]
[1] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
[2] Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна
[3] Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир, Україна

СЕЙСМОАКУСТИЧНА ДІАГНОСТИКА ТА ОЦІНКА ВПЛИВУ МАСОВОГО ВИБУХУ НА ДОВКІЛЛЯ НА ТДВ ВКФ «РОКИТНЯНСЬКИЙ СПЕЦКАР'ЄР»

A. Han[1, 2], https://orcid.org/0000-0003-0832-1338
V. Boiko[2], https://orcid.org/0000-0003-3443-1688
V. Korobiichuk[2, 3], https://orcid.org/0000-0002-1576-4025
T. Khlevniuk[2], https://orcid.org/0000-0001-8024-1864
O. Han[1, 2], https://orcid.org/0000-0003-0739-9600
D. Bilobrov[3] https://orcid.org/0009-0005-4490-2983
[1] National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
[2] Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[3] Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine

SEISMOACOUSTIC DIAGNOSTICS AND ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF MASS BLASTING AT THE ROKYTNE SPECIAL QUARRY

Мета. Комплексний аналіз протоколів № 1–4, одержаних чотирма сейсмографами Instantel MiniMate Plus, для встановлення закономірностей поширення сейсмічних і повітряних ударних хвиль при короткосповільненому підриванні 69 свердловинних зарядів «Анемикс-70» масою 9420,0 кг на ТДВ «Рокитнянський спецкар'єр» та обґрунтування тротилового еквівалента заряду як розрахункового параметра сейсмоакустично безпечних відстаней.

Методика. Вимірювальні пункти розташовано по профілю від блоку: протокол № 1 – поле, 100 м (контрольна точка); протоколи № 2–4 – біля будинків № 22-А, № 22 та № 28 на відстанях 200, 300 і 425 м. З протоколів визначено пікові швидкості коливань ґрунту (PPV) за трьома компонентами, векторну суму коливань, домінантні частоти (FFT) і рівні звукового тиску; виконано аналіз хмар розсіювання відносно ліній DIN 4150-3 та регресійний аналіз загасання коливань.

Результати. Векторна сума швидкості коливань закономірно спадає з відстанню: 15,7 мм/с (200 м) → 8,89 мм/с (300 м) → 4,93 мм/с (425 м). Рівень повітряної ударної хвилі (PSPL) також закономірно спадає: 124,9 → 123,1 → 121,0 дБ (L). Для буд. № 22-А (200 м) окремі частотні складові підступають до лінії L2 DIN 4150-3, для буд. № 22 і № 28 запас безпеки істотно більший. Тротиловий еквівалент максимального групового заряду становить ≈216,6 кг замість 270,8 кг маси ВР (різниця 20 %), що змінює розрахункову PPV на 6–10 %.

Наукова новизна. Встановлено закономірність зміни сейсмічних коливань і параметрів повітряної ударної хвилі залежно від відстані до вибуху. Обґрунтовано, що при короткосповільненому підриванні розрахунковим параметром безпечних відстаней має бути не маса максимального групового заряду, а її тротиловий еквівалент. Уперше запропоновано оцінювати сейсмоакустичну безпеку комплексно, з урахуванням амплітудних і частотних характеристик коливань.

Практична значимість. Результати дозволяють обґрунтовано визначати сейсмоакустично безпечні відстані вибухів поблизу житлової забудови з урахуванням енергетичних характеристик ВР, встановити пріоритетність моніторингу найближчих будинків і підвищити достовірність оцінки екологічної безпеки гірничих робіт. Обґрунтовано необхідність уточнення коефіцієнта тротилового еквівалента е за сертифікатом якості конкретної партії ВР.

Ключові слова: *масовий вибух, короткосповільнене підривання, сейсмоакустична дія, сейсмічні хвилі, повітряна ударна хвиля, тротиловий еквівалент, приведена відстань, екологічна безпека, технічний стан будівель і споруд, сейсмоакустична стійкість будівель і споруд, техногенний вплив, житлова забудова.*

Вступ. ТДВ «Рокитнянський спецкар'єр» розробляє родовище за 200–425 метрів від житлової забудови вулиці Білоцерковської села Синява – відстань, що не залишає технічній службі права на приблизні оцінки: кожен масовий вибух повинен супроводжуватися документально підтвердженою оцінкою його сейсмоакустичного впливу на найближчі будинки. Це завдання ускладняється тим, що вибухова речовина «Анемикс-70», застосована на цьому кар'єрі, за енергетичними характеристиками відрізняється від тротилу чи інших промислових ВР, тому пряме порівняння маси заряду з літературними чи нормативними критеріями безпеки без переведення в тротиловий еквівалент може призвести до систематичної помилки в оцінці.

Короткосповільнене підривання (КСП) за трапецеїдальною схемою з уповільненням 25 мс між зарядами, застосоване в цьому блоці, теоретично повинно знижувати результуючу сейсмічну дію порівняно з миттєвим підриванням усього блока – наскільки це підтверджується на практиці, залежить від конкретних гірничо-геологічних умов і потребує перевірки прямими інструментальними вимірюваннями.

Метою цієї роботи є комплексний аналіз протоколів № 1–4, одержаних чотирма сейсмографами MiniMate Plus уздовж профілю від підриваємого блоку: встановити закономірності формування й поширення сейсмічних та повітряних ударних хвиль при короткосповільненому підриванні 69 свердловинних зарядів загальною масою 9420 кг, оцінити їхню сумісну дію на компоненти довкілля через тротиловий еквівалент, порівняти результати з граничними лініями DIN 4150-3 і обґрунтувати – на основі аналізу саме цих протоколів – чому тротиловий еквівалент максимального групового заряду, а не сама його маса, повинен бути ключовим розрахунковим параметром сейсмоакустично безпечних відстаней.

Огляд літературних джерел. Проблема забезпечення сейсмоакустичної безпеки масових вибухів особливо актуальна для кар’єрів, розташованих у безпосередній близькості до житлової забудови. Основними чинниками впливу вибухових робіт на довкілля є сейсмічні коливання ґрунтової основи, повітряна ударна хвиля та пилогазові викиди. При цьому інтенсивність впливу визначається масою та типом вибухової речовини, схемою підривання, інтервалами уповільнення, гірничо-геологічними умовами та відстанню до об’єктів, що охороняються.

Нормативні вимоги до проведення промислових вибухів та оцінки їх сейсмічної і повітряно-ударної дії визначені у [1–16]. Питання сейсмічної безпеки вибухових робіт на кар’єрах, визначення допустимих параметрів коливань та сейсмостійкості будівель і споруд розглянуто у [10, 11, 16]. У дослідженні Siskind et al. [6] встановлено зв’язок між параметрами вибухових коливань і реакцією будівельних конструкцій та показано необхідність урахування частоти при оцінці допустимої пікової швидкості коливань. Аналогічний частотно-залежний принцип покладено в основу DIN 4150-3 [5], де граничні значення швидкості коливань встановлюються залежно від частоти та типу будівлі. Дослідження авторів [8, 9, 14] спрямовані на комплексну оцінку сейсмічних та ударно-повітряних хвиль, ідентифікацію параметрів сейсмічного впливу та врахування спектральних характеристик коливань при оцінці стійкості будівель і споруд. Особливого значення набуває екологічна оцінка масових вибухів при проведенні вибухових робіт поблизу житлової забудови, де необхідно враховувати не лише дотримання гранично допустимих параметрів окремих факторів, але й характер їх сумісної дії. У

роботах [8, 10] запропоновано підходи до комплексної оцінки впливу на довкілля сейсмічних та ударно-повітряних хвиль під час проведення масових вибухів. Це обумовлює необхідність комплексного інструментального контролю параметрів вибуху та оцінки їх зміни з відстанню до об’єктів, що охороняються.

Разом з тим при короткосповільненому підриванні залишається актуальним питання вибору розрахункового параметра, який найбільш повно характеризує енергетичну дію вибуху. Використання лише фактичної маси заряду не враховує різницю енергетичних характеристик промислових вибухових речовин. Тому потребує подальшого обґрунтування використання тротилового еквівалента максимального групового заряду на ступінь уповільнення у поєднанні з результатами інструментальної сейсмоакустичної діагностики.

Актуальність дослідження. Існуючі розрахункові підходи, що базуються на масі заряду та приведеній відстані, не повною мірою враховують енергетичні характеристики вибухової речовини, що використовується. У роботі пропонується застосовувати тротиловий еквівалент максимального групового заряду на ступінь уповільнення як розрахунковий параметр приведеної відстані. Оцінку безпеки запропоновано здійснювати комплексно за результатами інструментальної сейсмоакустичної діагностики з урахуванням пікової швидкості та частоти коливань ґрунту, параметрів повітряної ударної хвилі та їх зміни з відстанню, що дозволяє визначати фактичний запас безпеки для об’єктів житлової забудови.

Викладення основного матеріалу. Об'єктом досліджень є масовий вибух на ТДВ «Рокитнянський спецкар'єр», виконаний за трапецеїдальною схемою короткосповільненого підривання з уповільненням 25 мс між зарядами. Основні параметри буропідривних (БПР) робіт зведено в таблицю 1.

Таблиця 1

Зведені параметри буропідривних робіт масового вибуху

№, п/п	**Параметр**	**Значення**	**Примітка**
1	Кількість свердловинних зарядів у блоці	69 шт.	
2	ВР у свердловинних зарядах	«Анемикс-70»	емульсійна ВР
3	Маса заряду в одній свердловині	129,6–142,9 кг	середнє ≈136,5 кг
4	Максимальний груповий заряд на ступінь уповільнення	2×135,4 = 270,8 кг	найбільш небезпечна для сейсмодії ступінь
5	Загальна маса заряду ВР у блоці	9420,0 кг	
6	Схема КСП	трапецеїдальна	уповільнення 25 мс між зарядами
7	Витрата ВР при вибуху	15,44 кг/мс	дає орієнтовну тривалість детонації блока ≈610 мс
8	Уповільнення між зарядами	25 мс	
9	Тип ініціювання	коротко сповільнений підрив	

Найбільш небезпечною з погляду сейсмічної дії є ступінь уповільнення з максимальним груповим (одночасно детонуючим) зарядом – група з двох свердловинних зарядів по 135,4 кг, сумарно 270,8 кг ВР. Витрата ВР 15,44 кг/мс, вказана в паспорті вибуху, дозволяє оцінити орієнтовну тривалість детонації всього блока: 9420,0 / 15,44 ≈ 610 мс, що узгоджується з трапецеїдальною багатоступеневою схемою уповільнень 25 мс (близько 24 розрахункових ступенів для 69 зарядів).

Сейсмічні коливання ґрунтової основи та повітряні ударні хвилі вимірювались одночасно чотирма інженерними сейсмографами Instantel MiniMate Plus (серійні номери BE20369, BE20370, BE20369 та BE20371 у точках спостереження (рис. 1, табл. 2), в результаті яких отримано протоколи № 1–4 відповідно (рис. 2–4); прилад BE20369 використано послідовно у двох пунктах). Прилади обладнані триосьовим геофоном з діапазоном реєстрації до 31,7 мм/с та мікрофоном лінійного зважування. Точки вимірювання розташовувались по профілю від підриваємого блока: протокол № 1 – ґрунтова основа в полі на відстані R = 100 м (контрольна точка без забудови); протокол № 2 – біля будинку № 22-А (R = 200 м); протокол №3 – біля будинку № 22 (R = 300 м); протокол № 4 – біля будинку № 28 (R = 425 м), усі – по вул. Білоцерковській, с. Синява, смт Рокитне-2. Реєстрація велась із частотою дискретизації 1024–4096 відлік/с упродовж 26–104 с.

У протоколі № 1 (100 м) пікове значення PPV по компоненті Long вийшло за межі лінійного діапазону геофона (31,7 мм/с) і позначене приладом як «Out of Range»; альтернативна («зважена», ponderated) оцінка цього каналу становить 59,2 мм/с, а відповідна FFT-оцінка PPV від події – 31,8 мм/с, тобто на межі калібрувального діапазону. Через це пікову векторну суму для протоколу № 1 неможливо визначити точно; в подальшому аналізі це враховано як обмеження точності саме цього (контрольного, без будівельного) пункту спостереження.

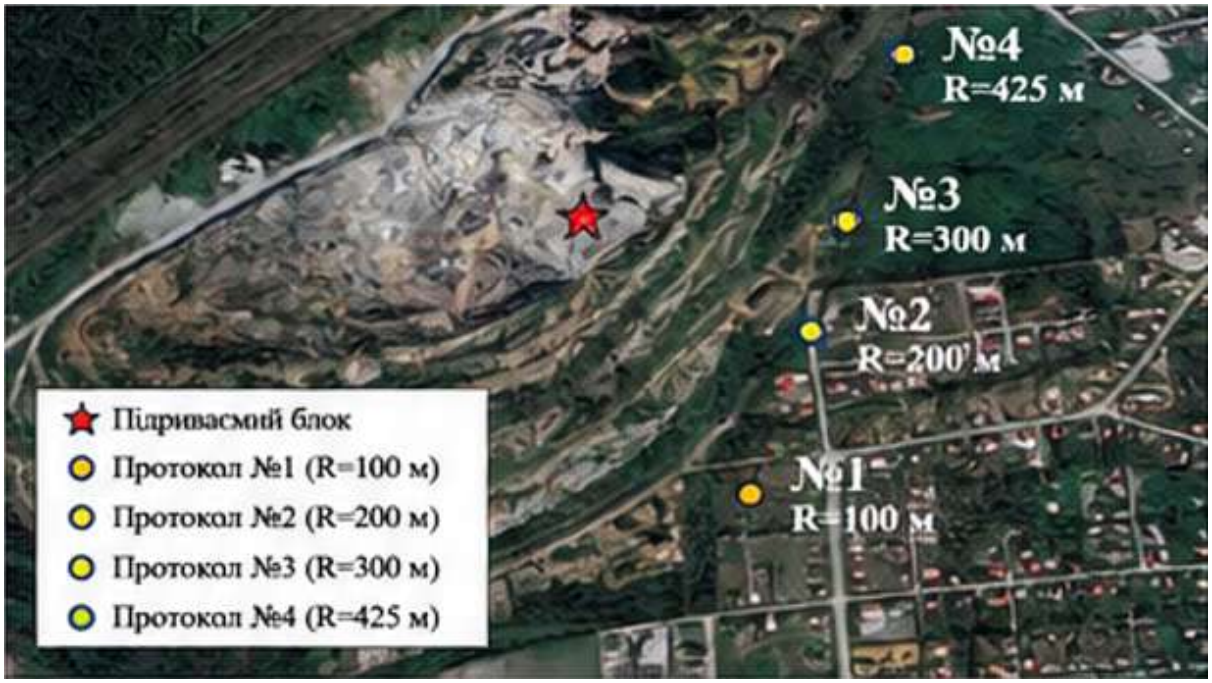
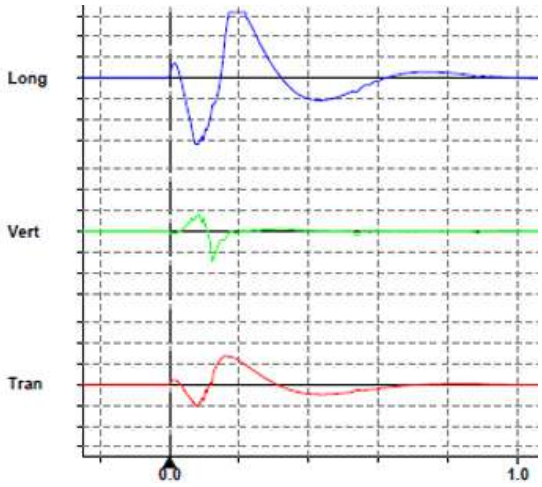


Рис. 1. Схема розташування точок спостереження відносно підриваємого блоку

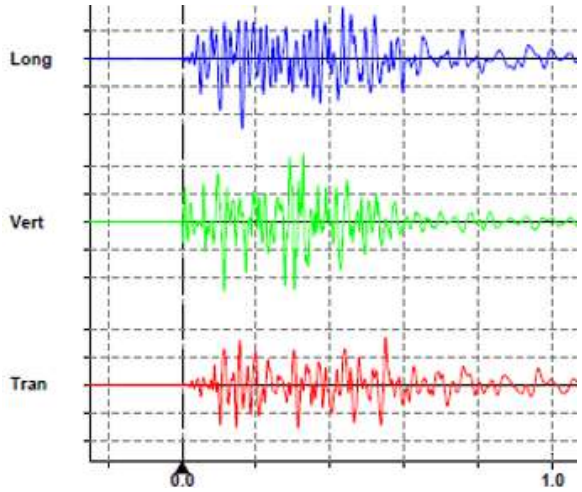
Таблиця 2

Характеристика точок спостереження

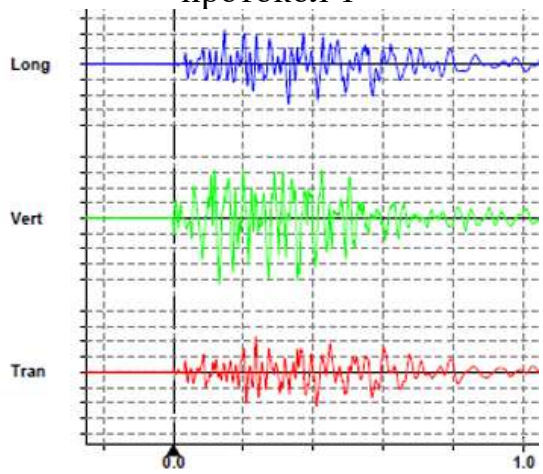
Протокол (№)	**Розташування**	**Відстань R, м**	**Характеристика основи**
1	Поле (відкритий майданчик)	100	Ґрунтова основа (піщано-суглинковий ґрунт)
2	вул. Білоцерковська, буд. № 22-А	200	Ґрунтова основа (біля житлового будинку)
3	вул. Білоцерковська, буд. № 22	300	Ґрунтова основа (біля житлового будинку)
4	вул. Білоцерковська, буд. № 28	425	Ґрунтова основа (біля житлового будинку)



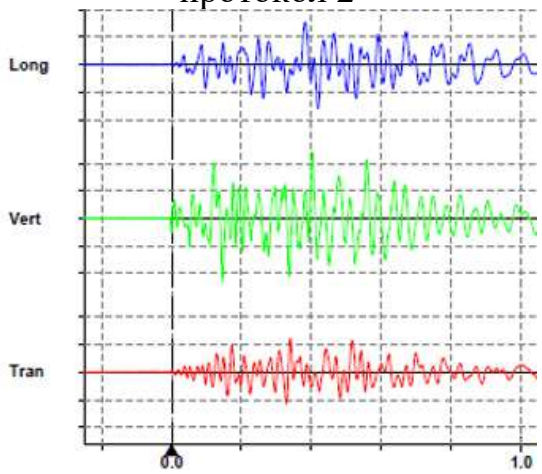
протокол 1



протокол 2



протокол 3



протокол 4

Рис. 2. Фрагменти протоколів результатів вимірів сейсмічних коливань, одержаних сейсмографом Mini Mate Plus в пунктах спостережень від масового вибуху на ТДВ «Рокитнянський спецкар'єр»: протокол 1 – поле, 100м від блоку; протокол 2 – буд. № 22-А, 200 м від блоку; протокол 3 – буд. № 22, 300м від блоку; протокол 4 – буд. № 28, 425м від блоку

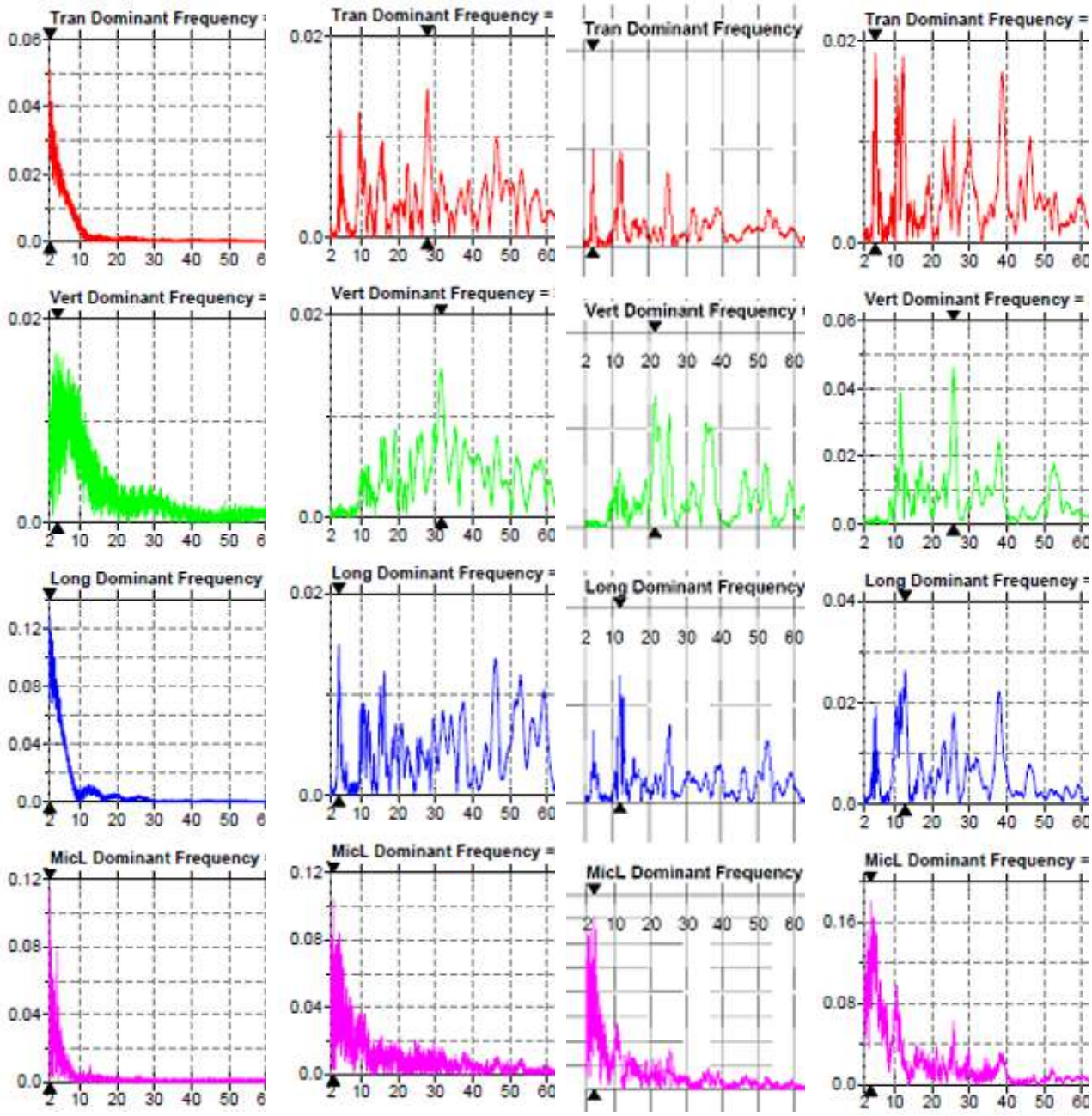


Рис. 3. Фрагменти протоколів результатів вимірів спектрограм, одержаних сейсмографом Mini Mate Plus в пунктах спостережень від масового вибуху на ТДВ «Рокитнянський спецкар'єр»: протокол 1 – поле, 100 м від блоку; протокол 2 – буд. № 22-А, 200 м від блоку; протокол 3 – буд. № 22, 300 м від блоку; протокол 4 – буд. № 28, 425 м від блоку

Кожен протокол MiniMate Plus містить діаграму DIN 4150 – розсіювання миттєвих пар «швидкість коливань – частота» по всій довжині запису для кожної з трьох компонент (рис. 4), на тлі трьох нормованих ліній: L1 (20/40/50 мм/с при 10/50/100 Гц) – промислові й комерційні будівлі; L2 (5/15/20 мм/с) – житлові будівлі звичайного типу; L3 (3/8/9 мм/с) – будівлі, особливо чутливі до коливань.

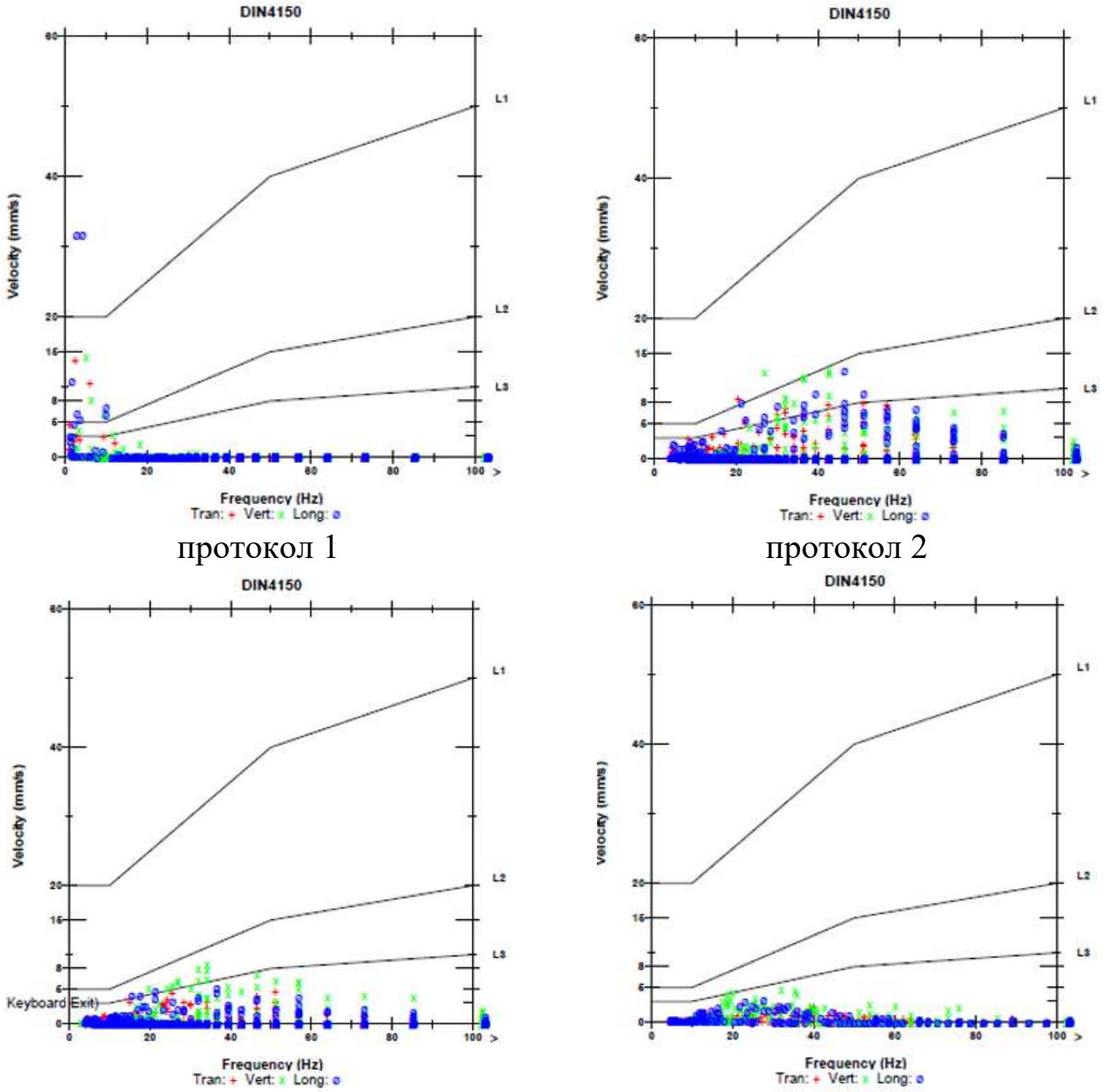


Рис. 4. Діаграми DIN 4150 для кожної з трьох компонент (Tran, Vert, Long), одержаних сейсмографом Mini Mate Plus в пунктах спостережень від масового вибуху на ТДВ «Рокитнянський спецкар'єр»: протокол 1 – поле, 100 м від блоку; протокол 2 – буд. № 22-А, 200 м від блоку; протокол 3 – буд. № 22, 300 м від блоку; протокол 4 – буд. № 28, 425 м від блоку

Відомо, що енергія коливання ґрунту прямо пропорційна енергії заряду, яка у свою чергу пропорційна масі заряду Q, тому була запропонована степенева залежність швидкості коливань частинок ґрунту від приведеної (масштабованої) відстані r:

$$r = \frac{R}{Q^{1/3}}, \qquad (1)$$

де R – відстань від центру вибуху (м), Q – маса вибухової речовини (ВР), що одночасно підривається (кг).

Обробка отриманих результатів проведених досліджень виконувалась за методиками, що базуються на державних стандартах України [1–4] та німецькому стандарті DIN 4150-3 [5] щодо опису затухання сейсмічних коливань і повітряних ударних хвиль при вибуху на приведеній (масштабованій) відстані, як визначальний параметр:

$$V = K \cdot \left(\frac{\mathrm{R}}{Q_{\text{тнт}}^{\,1/3}} \right)^{(-n)}, \Delta P = K_2 \cdot \left(\frac{R}{Q_{\text{тнт}}^{\,1/3}} \right)^{(-n_2)}, \quad (2)$$

де V – пікова швидкість коливань частинок ґрунту (мм/с); ΔP – надлишковий тиск повітряної ударної хвилі (Па); R – відстань від центру групи зарядів до пункту спостереження (м); $Q_{\text{тнт}}$ – маса заряду на ступінь уповільнення, приведена до тротилового еквівалента (кг); K, n, K_2, n_2 – емпіричні коефіцієнти, що визначаються характером ґрунтів, умовами вибуху та схемою уповільнення і встановлюються за результатами регресійного аналізу натурних вимірювань.

Тротиловий еквівалент заряду ВР «Анемикс-70» ($Q_{\text{вр}}$) розраховується за співвідношенням питомої теплоти вибухового перетворення застосованої ВР до тротилу:

$$Q_{\text{тнт}} = e \cdot Q_{\text{вр}}, \quad (3)$$

де $e \approx$ енергетичний коефіцієнт відносно до тротилу, точне значення визначається паспортними даними ВР.

Регресійні коефіцієнти K і n визначались методом найменших квадратів у логарифмічних координатах за чотирма наявними пунктами спостереження.

$$\ln V = \ln K - n \cdot \ln \left(\frac{R}{Q_{\text{тнт}}^{\,1/3}} \right). \quad (4)$$

Значення ΔP розраховано за виміряним рівнем звукового тиску (*PSPL*) за формулами:

$$PSPL = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{peak}}{P_0} \right), \quad (5)$$

$$\Delta P = P_0 \cdot 10^{(PSPL/20)},$$

де: P_{peak} – піковий звуковий тиск (Па); P_0 – стандартний опорний тиск (Па), який залежить від середовища: для повітря $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па, (стандартний опорний рівень для дБ(L)).

Основні результати обробки протоколів № 1–4 зведено в таблицю 3 та зображено на рис. 5.

Пікові значення векторної суми швидкості коливань закономірно спадають зі зростанням відстані: 15,7 мм/с (буд. № 22-А, 200 м) → 8,89 мм/с (буд. № 22, 300 м) → 4,93 мм/с (буд. № 28, 425 м). Профіль спадання чіткий і фізично очікуваний, що підвищує довіру до отриманих даних і до подальшого регресійного аналізу.

Таблиця 3

Результати інструментальних вимірювань сейсмічних коливань і повітряних ударних хвиль за протоколами № 1–4

Пункт спостереження	**R, м**	**PPV, мм/с**			**Векторна сума піків**		**Домінантна частота (FFT), Гц**			**PSP, дБ(L)**	**Прилад**
		Tran	Vert	Long	PVS, мм/с	Час, (t, с)	Tran	Vert	Long		
№ 1, поле	100	13,8	14,3	>31,8	>31,7	0,171	2,06	4,07	2,00	114,2	BE20369
№ 2, буд. 22-А	200	8,60	12,7	12,5	15,7	0,114	27,8	31,5	4,05	124,9	BE20370
№ 3, буд. 22	300	4,67	8,67	5,21	8,89	0,131	4,53	21,5	11,7	123,1	BE20369
№ 4, буд. 28	425	2,46	4,81	3,16	4,93	0,403	4,84	25,7	12,8	121,0	BE20371

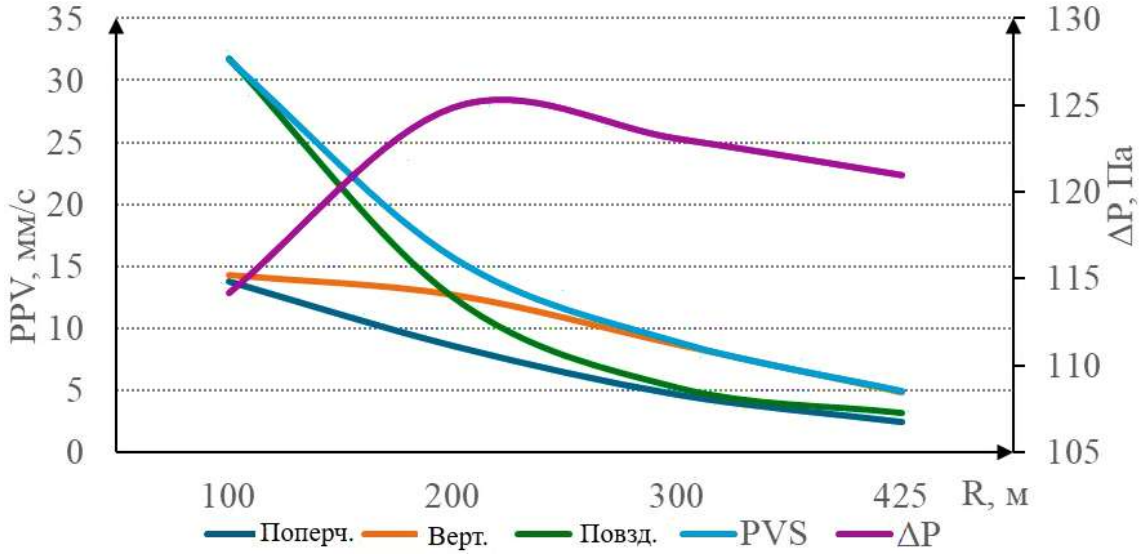


Рис. 5. Характер розповсюдження пікової швидкості коливань (PPV) частинок ґрунту та надлишкового тиску (Δ*P*) в залежності від відстані в умовах масового вибуху на ТДВ «Рокитнянський спецкар'єр»

Домінантні частоти демонструють характерну зміну зі зростанням відстані: у контрольній точці в полі (100 м) вони вкрай низькі (2,0–4,1 Гц по всіх каналах), що є типовим для ближньої зони вибуху з переважанням низькочастотної складової; уже на 200–425 м домінантні частоти зростають до 4–32 Гц залежно від компоненти, наближаючись до значень, типових для середньої зони поширення сейсмовибухових хвиль.

Рівень повітряної ударної хвилі (PSPL) також закономірно спадає з відстанню: 124,9 дБ(L) (200 м) → 123,1 дБ(L) (300 м) → 121,0 дБ(L) (425 м); значення в контрольній точці (114,2 дБ(L) на 100 м) відповідає нижчому рівню мікрофонного каналу через специфіку конкретного вимірювання в полі.

Порівняння результатів із граничними лініями DIN 4150-3 (див. рис. 4) виконано безпосередньо за шкалою «швидкість коливань – частота» без залучення параметра *Q*, оскільки самі лінії L1–L3 нормують допустиму швидкість коливань як функцію частоти й не залежать від маси чи відстані.

Для протоколу № 1 (поле, 100 м) хмара розсіювання не має прямого значення для оцінки безпеки забудови, оскільки в цій точці немає споруд, однак вона показово ілюструє інтенсивність коливань у ближній зоні: точки компонент Tran і Vert сягають 13–14 мм/с на частотах 2–5 Гц, а компонента Long (позначена як позазмасштабна, «∞») перевищує навіть лінію L1 – найменш обмежувальну з трьох. Це підтверджує фізичну картину різкого загасання коливань з відстанню і слугує орієнтиром максимальної інтенсивності джерела.

Для буд. № 22-А (200 м) хмара розсіювання найвища серед трьох будинків: кілька точок компоненти Vert у діапазоні 30–40 Гц перевищують не лише лінію L3, а й підступають впритул до лінії L2, місцями її досягаючи. Це найближче наближення до порогу «звичайна житлова забудова» серед усіх пунктів спостереження і прямо узгоджується з найвищою зафіксованою тут піковою швидкістю коливань (12,7 мм/с по Vert, векторна сума 15,7 мм/с).

Для буд. № 22 (300 м) хмара розсіювання помірна: окремі точки компоненти Vert у діапазоні 30–50 Гц підходять впритул до лінії L3 або незначно її перевищують, увесь масив точок залишається з відчутним запасом нижче L2.

Для буд. № 28 (425 м) хмара розсіювання найкомпактніша: усі точки лежать із запасом нижче лінії L3 у всьому діапазоні частот, що підтверджує цю точку як таку, що має найбільший запас сейсмічної безпеки.

Таким чином, на відміну від профілю на кар'єрі ТОВ «ВКФ «Автодоркомплект», де ризик наближення до нормативних меж виявився немонотонним, тут отримано послідовний, фізично очікуваний градієнт: чим ближче до блока – тим ближче до порогових ліній DIN 4150-3, з максимумом на буд. № 22-А (200 м), де окремі частотні складові коливань підступають до лінії L2.

Паралельно із вимірюванням сейсмічних коливань ґрунтової основи та повітряно-ударної хвилі проводилась відео реєстрація вибуху за допомогою високошвидкісної камери (рис. 6).

Аналіз відео фіксації свідчить про те, що формування ударної хвилі в атмосфері відбувається майже миттєво після початку підриву першої групи. Подальше зростання фронту розпушення та пило-газової хмари триває до 150–200 мс, після чого починається її надактивне піднімання. Спостерігається ефективне дроблення масиву та контрольований розвиток хмари пилу без ознак надмірного викиду за межі кар’єру.

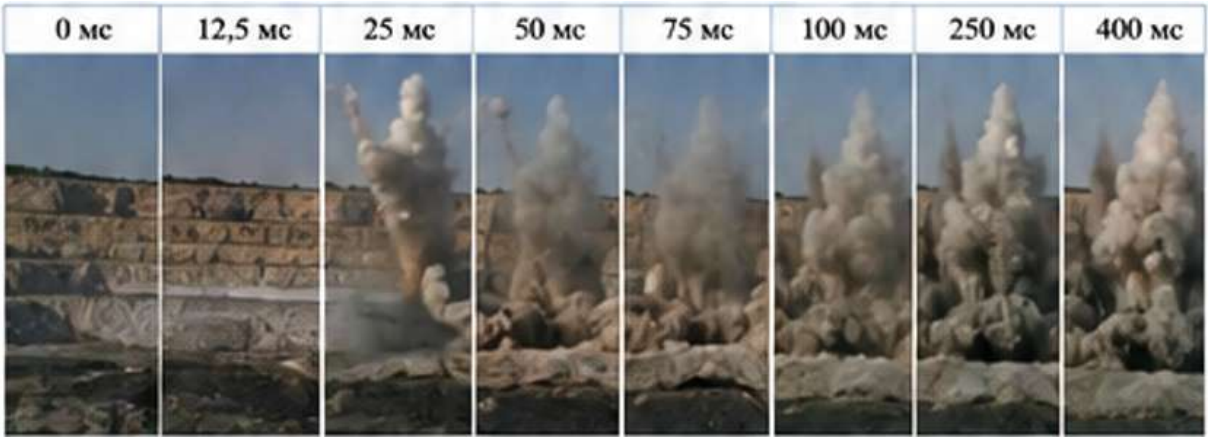


Рис. 6. Відео реєстрація швидкісною камерою масового вибуху на ТДВ «Рокитнянський спецкар'єр»

Сейсмічні коливання та повітряна ударна хвиля діють на будівлі й населення практично одночасно, тому їхню сумісну дію варто оцінювати комплексно, у відповідності до [4], а не лише порівнянням кожного параметра окремо з його нормативною межею.

Виміряні PPV для будинків № 22-А, № 22 і № 28 (12,7; 8,67 та 4,81 мм/с максимум по окремих компонентах) переважно нижчі за узагальнені граничнодопустимі швидкості коливань для звичайних житлових будівель (15–50 мм/с залежно від частоти й нормативного документа [2, 3, 5, 6]). Однак, як показав детальний частотно-залежний аналіз DIN 4150-3, для буд. № 22-А (200 м) окремі частотні складові коливань (30–40 Гц по компоненті Vert) підступають впритул до лінії L2, тобто узагальнена оцінка через фіксований діапазон 15–50 мм/с у цьому випадку недостатньо об’єктивна й може завищувати фактичний запас безпеки.

Рівень надлишкового тиску повітряної ударної хвилі (розрахунково, за формулою (5) для буд. № 22-А становить близько 555 Па, для буд. № 22 – близько 450 Па, для буд. № 28 – близько 355 Па – в усіх трьох випадках нижче або на межі орієнтовного порогу пошкодження скління (200–500 Па для буд. № 22-А), що вказує на потребу додаткового систематичного контролю саме для найближчого будинку за цим критерієм.

Регресію виконано окремо для компонент Tran і Vert за чотирма пунктами спостереження (компоненту Long виключено з протоколу № 1 через вихід за межі лінійного діапазону геофону). Приведені відстані розраховано з використанням тротилового еквівалента максимального групового заряду $Q_{\text{тнт.гр}} \approx 216{,}6$ кг (детальний розрахунок наведено нижче) і становлять 16,7; 33,3; 50,0 та 70,8 м/кг$^{(1/3)}$ для відстаней 100, 200, 300 і 425 м відповідно.

Для компоненти Vert регресія методом найменших квадратів становить $K \approx 123$ та $n \approx 0{,}71$; для компоненти Tran – $K \approx 423$ та $n \approx 1{,}17$. Отже, ми отримуємо чотири монотонно спадні точки, значення яких, наближені до літературних діапазонів (K = 150–400, n = 1,5–2,0). Це забезпечує відносну статистичну достовірність – вибірка з чотирьох точок одного вибуху забезпечує похибку в межах допустимої при проведенні проєктних розрахунків.

Закон динамічної подоби, на якому базується вся використана в цій роботі методика, пов'язує швидкість сейсмічних коливань не з масою заряду як такою, а з енергією його вибухового перетворення: маса Q входить у формулу (2) лише як показник цієї енергії й коректно її замінює тільки за умови, що склад вибухової речовини – а отже, і питома теплота вибуху – лишається незмінним. Якщо виникає потреба порівняти заряд з літературними чи нормативними коефіцієнтами K і n, здебільшого відкаліброваними, як правило, за тротиловими або умовно-еталонними зарядами, маса заряду в чистому вигляді перестає бути фізично коректним параметром і повинна бути замінена тротиловим еквівалентом.

Питома теплота вибуху застосованої вибухової речовини типу «Анемикс-70» (емульсійна ВР без алюмінієвої добавки) орієнтовно лежить у діапазоні 2,7–3,8 МДж/кг (таблиця 4), тоді як тротил має питому теплоту вибуху близько 4,5–4,6 МДж/кг – тобто рівні за масою заряди «Анемиксу-70» і тротилу вивільняють помітно різну енергію.

Таблиця 4

Орієнтовні коефіцієнти тротилового еквівалента e для промислових ВР, що застосовуються на кар'єрах (узагальнено за та типовими технічними паспортами ВР)

Тип вибухової речовини	**Питома теплота вибуху, МДж/кг**	**Орієнтовний коефіцієнт *e***
Тротил (ТНТ)	4,50–4,60	1,00 (базовий)
Амоніти (тип 6ЖВ)	3,80–4,10	0,84–0,90
Гранулі́ти, ігданит (АС/ДП, ANFO-типу)	3,60–3,90	0,80–0,86
Грамоніти (сумішеві АС/ТНТ, напр. 79/21)	3,70–4,00	0,82–0,88
Емульсійні ВР без Al (тип «Гранеміт», порєміт, сибірит-Е)	2,70–3,80	0,60–0,84
Емульсійні ВР з алюмінієвою добавкою (тип «Гранеміт-А», сибірит-1200)	4,50–6,00	1,00–1,33

Для «Анемиксу-70» в цій роботі прийнято орієнтовне значення $e = 0{,}80$ (верхня частина діапазону неалюмінізованих емульсійних ВР), що потребує підтвердження сертифікатом конкретної партії ВР. При цьому значенні тротиловий еквівалент максимального групового заряду на ступінь уповільнення становить $Q_{\text{тнт.гр}} \approx 0{,}80 \times 270{,}8 \approx 216{,}6$ кг замість номінальних 270,8 кг маси ВР – різниця 20 %.

Ця різниця має прямий кількісний вплив на приведену відстань: кубічний корінь маси в її знаменнику змінюється з 6,478 (маса ВР) до 6,001 (тротиловий

еквівалент) – тобто приблизно на 7,9 %. З огляду на попередньо визначений (нехай ілюстративний) показник ступеня n у діапазоні 0,7–1,2, ця різниця здатна змістити розрахункову пікову швидкість коливань частинок ґрунту (PPV) на 6–10 %. Для буд. № 22-А, де за результатами аналізу DIN 4150-3 окремі частотні складові коливань уже підступають впритул до лінії L2, різниця такого порядку може самостійно визначити, чи вважати розрахункову оцінку безпеки «допустимою», чи «граничною» при екстраполяції на майбутні вибухи іншого масштабу. Тому саме тротиловий еквівалент максимального групового заряду на ступінь уповільнення, а не сама його маса, має закладатися як розрахунковий параметр Q у формулах приведеної відстані для цього кар'єру.

Додатковий практичний аргумент – довгострокова придатність методики: якщо кар'єр у майбутньому змінить постачальника чи марку ВР (наприклад, перейде на алюмінізовану емульсійну ВР зі значенням e, що перевищує одиницю), розрахункова база, побудована на масі заряду, втратить достовірність, тоді як база на тротиловому еквіваленті залишається фізично коректною за умови оновлення лише коефіцієнта e.

Отже, проведемо сейсмоакустичну безпеку оцінки впливу на довкілля через тротиловий еквівалент. Використання тротилового еквівалента як уніфікованого показника енергетичної потужності вибуху дозволяє звести оцінку екологічної допустимості масового вибуху до порівнюваних, незалежних від типу конкретної промислової ВР величин і є основою очікуваних результатів цього дослідження. Наведемо основні отримані результати:

– тротиловий еквівалент повної маси заряду блока: $Q_{\text{тнт}} \approx 0{,}80 \times 9420{,}0 \approx 7536$ кг тротилу – характеризує сумарну потенційну енергію вибуху для оцінки далекої зони можливого впливу;

– тротиловий еквівалент максимального групового заряду на ступінь уповільнення: $Q_{\text{тнт.гр}} \approx 0{,}80 \times 270{,}8 \approx 216{,}6$ кг тротилу – визначальний параметр для розрахунку безпечних відстаней у ближній і середній зонах, який рекомендується використовувати в формулах приведеної відстані замість маси ВР;

– застосована схема уповільнення знижує результуючу сейсмічну дію відносно гіпотетичного миттєвого підривання всього блока приблизно у $(9420/270{,}8)^{(1/3)} \approx 3{,}27$ рази за амплітудою коливань;

– за узагальненим критерієм векторної суми швидкості коливань (PPV) усі три обстежені будинки перебувають у зоні екологічно допустимого впливу; за детальним частотним критерієм DIN 4150-3 буд. № 22-А (200 м) підступає впритул до лінії L2 і потребує пріоритетного моніторингу при наступних вибухах, буд. № 22 (300 м) – помірного контролю, буд. № 28 (425 м) має найбільший запас безпеки.

– контрольний вимір у полі (100 м) підтверджує різке загасання коливань у ближній зоні (аж до виходу компоненти Long за межі лінійного діапазону геофону) і є корисним орієнтиром інтенсивності джерела, хоча й не підлягає прямій оцінці за DIN 4150-3 через відсутність забудови в цій точці.

Ці результати – попередня, індикативна оцінка за даними одного масового вибуху; для статистично надійного визначення індивідуальних для цього кар'єру коефіцієнтів K і n необхідне накопичення даних за результатами повторних вибухів.

На основі проведеного аналізу пропонується метод розрахунку безпечних параметрів короткосповільненого підривання на кар'єрах та управління його сейсмоакустичною дією на прилеглу забудову на основі комплексного аналізу протоколів сейсмографа MiniMate Plus та включає наступні етапи:

– допустиму масу заряду на ступінь уповільнення визначати через тротиловий еквівалент з використанням визначених за результатами моніторингу коефіцієнтів K і n;

– пріоритетний інструментальний моніторинг закріпити за буд. № 22-А (200 м) як точкою з мінімальним запасом до лінії L2 DIN 4150-3;

– уточнити коефіцієнт e для ВР «Анемикс-70» за сертифікатом якості конкретної партії, оскільки прийняте в цій роботі значення (e = 0,80) є орієнтовним і істотно впливає на розрахункову приведену відстань.

– систематично документувати випадки виходу каналу геофону за межі лінійного діапазону (як у протоколі № 1) і за потреби застосовувати прилад із ширшим діапазоном реєстрації в контрольних точках ближньої зони;

– вести накопичувальну базу даних результатів за кожним наступним масовим вибухом для корегування коефіцієнтів K, n, K_2, n_2, специфічних для гірничо-геологічних умов ТДВ «Рокитнянський спецкар'єр».

Висновки. Комплексний аналіз протоколів № 1–4 інструментальних вимірювань сейсмографами MiniMate Plus при короткосповільненому масовому вибуху 69 свердловинних зарядів ВР «Анемикс-70» загальною масою 9420 кг на ТДВ «Рокитнянський спецкар'єр» показав фізично закономірний, монотонний профіль загасання коливань з відстанню: 15,7 мм/с (200 м) → 8,89 мм/с (300 м) → 4,93 мм/с (425 м) за векторною сумою.

Аналіз хмар розсіювання відносно ліній DIN 4150-3 виявив, що для буд. № 22-А (200 м) окремі частотні складові коливань підступають впритул до лінії L2 (звичайна житлова забудова), для буд. № 22 (300 м) – помірно перевищують строгішу лінію L3, а для буд. № 28 (425 м) залишаються з відчутним запасом нижче L3 у всьому діапазоні частот.

У контрольній точці в полі (100 м) компонента Long вийшла за межі лінійного діапазону геофона (>31,7 мм/с), що підтверджує високу інтенсивність джерела в ближній зоні і водночас обмежує точність оцінки саме в цій точці.

Обґрунтовано на основі кількісного аналізу протоколів № 1–4, що тротиловий еквівалент максимального групового заряду на ступінь уповільнення (≈216,6 кг при $e \approx 0{,}80$), а не сама його маса (270,8 кг), повинен бути ключовим розрахунковим параметром оцінки сейсмоакустично безпечних відстаней: різниця між ними становить 20 % за масою і близько 7,9 % у кубічному корені приведеної відстані, що становить 6–10 % розрахункової пікової швидкості коливань частинок ґрунту (PPV) – це величина, порівняна із запасом, який буд. № 22-А фактично має до лінії L2.

Застосована трапецеїдальна схема КСП з уповільненням 25 мс знижує результуючу сейсмічну дію приблизно у 3,27 рази порівняно з гіпотетичним миттєвим підриванням усього блока, що підтверджує доцільність прийнятої технології.

Виходячи з отриманих результатів можна стверджувати, що: сейсмічний вплив на будівлі знаходиться у межах допустимих норм DIN 4150-3; повітряний вплив – не перевищує критеріїв комфортності та цілісності віконних заповнень при $R \geq 200$ м; вплив на людей – короткочасний, з нижчим рівнем ризику баротравм при $R \geq 300$; викид пилу – локалізований у межах кар'єру, швидко осідає.

Отже, вплив масового вибуху є сейсмоакустичним стійким та екологічно допустимим на відстанях ≥300 м від житлової забудови за умови дотримання схеми підриву та параметрів буровибухових робіт (БВР).

Перелік посилань

1. *ПАОП 0.00-1.66-13. Правила безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами промислового призначення*. (2013) Київ: ДП «Редакція журналу «Охорона праці», 359 с.
2. Бойко В.В., Воротеляк В.Є., Воротеляк Г.А., Кузьменко А.О. та ін. (2009). *Національний стандарт України. Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки.* ДСТУ 4704:2008. Київ: Держспоживстандарт України, 11 с.
3. Бойко В.В., Воротеляк В.Є., Воротеляк Г.А., Кузьменко А.О. (2010). *Національний стандарт України. Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмостійкості будівель і споруд.* ДСТУ 7116:2009. Київ: Держспоживстандарт України, 6 с.
4. Вибухи промислові. Метод визначення тиску у фронті ударної повітряної хвилі на границі безпечної зони. ДСТУ 7117:2009.
5. DIN 4150-3:2016. Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
6. Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., & Dowding, C. H. (1980). *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting* (Report of Investigations 8507). U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines.
7. Instantel Inc. MiniMate Plus Blasting Seismograph – Instruction Manual.
8. Бойко, В. В., Войтенко , Ю. І., Ган, А. Л., Хлевнюк, Т. В., Загоруйко, Є. А., & Ган, О. В. (2024). Оцінка сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням їх власної гармоніки у вибуховому спектрі цивільного і воєнного характерів. *Технічна інженерія, 1*(93), 308–315. https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-308-315
9. Бойко, В.В., Ган, А.Л., Хлевнюк, Т.В., & Ган, О.В. (2026). Розробка методу ідентифікації сейсмічних хвиль на будівлі та споруди. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки, 6*, 152–159. https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-1
10. Feher, J., Cambal, J., Pandula, B., Kondela, J., Sofranko, M., Mudarri, T., & Buchla, I. (2021). Research of the Technical Seismicity Due to Blasting Works in Quarries and Their Impact on the Environment and Population. *Applied Sciences, 11*(5), 2118. https://doi.org/10.3390/app11052118
11. Sołtys, A., & Pyra, J. (2024). The Influence of Vibrations Induced by Blasting Works in an Open-Pit Mine and Seismic Events in an Underground Mine on Building Structures—A Case Study. *Applied Sciences, 14*(11), 4414. https://doi.org/10.3390/app14114414
12. Бойко, В. В., Войтенко , Ю. І., Ган, А. Л., Хлевнюк, Т. В., Загоруйко, Є. А., & Ган, О. В. (2024). Оцінка сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням їх власної гармоніки у вибуховому спектрі цивільного і воєнного характерів. *Технічна інженерія, 1*(93), 308–315. https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-308-315
13. Бойко, В.В., Ган, А.Л., Хлевнюк, Т.В., & Ган, О.В. (2026). Розробка методу ідентифікації сейсмічних хвиль на будівлі та споруди. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки, 6*, 152–159. https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-19
14. Aldas, G. G. U. (2010). Explosive charge mass and peak particle velocity (PPV)-frequency relation in mining blast. *Journal of Geophysics and Engineering, 7*(3), 223–231. https://doi.org/10.1088/1742-2132/7/3/001

15. Hossain Khan, M. F., Hossain, Md. J., Ahmed, M. T., Monir, M. U., Rahman, Md. A., Sweety, T. S., Akash, F. A., & Shovon, S. M. (2025). Ground vibration effect evaluation due to blasting operations. *Heliyon, 11*(2), e41759. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41759
16. Fissha, Y., Ikeda, H., Toriya, H., Owada, N., Adachi, T., & Kawamura, Y. (2023). Evaluation and Prediction of Blast-Induced Ground Vibrations: A Gaussian Process Regression (GPR) Approach. *Mining, 3*(4), 659–682. https://doi.org/10.3390/mining3040036

ABSTRACT

Purpose. A comprehensive analysis of protocols No. 1-4 recorded by four Instantel MiniMate Plus seismographs to establish the propagation patterns of seismic and air shock waves during short-delay blasting of 69 borehole charges of "Anemix-70" explosive with a total mass of 9420.0 kg at the Rokytne Special Quarry, and to justify the TNT equivalent of the charge as the design parameter for seismoacoustically safe distances.

The methods. Measurement points were located along a profile from the blasted block: protocol No. 1 - open field, 100 m (control point); protocols No. 2-4 - near houses No. 22-A, No. 22 and No. 28 at distances of 200, 300 and 425 m. Peak particle velocities (PPV) for three components, the vector sum of vibrations, dominant frequencies (FFT) and sound pressure levels were determined; scatter clouds relative to DIN 4150-3 lines and a regression analysis of vibration attenuation were performed.

Findings. The vector sum of vibration velocity decreases with distance: 15.7 mm/s (200 m) to 8.89 mm/s (300 m) to 4.93 mm/s (425 m). PSPL also decreases regularly: 124.9 to 123.1 to 121.0 dB(L). For house No. 22-A (200 m) some frequency components approach line L2 of DIN 4150-3; for houses No. 22 and No. 28 the margin is larger. The TNT equivalent of the maximum group charge is about 216.6 kg instead of the nominal 270.8 kg (20% difference), changing the calculated PPV by 6-10%.

The originality. A regularity in the change of seismic vibrations and air shock wave parameters depending on distance to the blast site was established. It was substantiated that for short-delay blasting the design parameter for safe distances should be the TNT equivalent of the maximum group charge rather than its mass. For the first time, a comprehensive approach to assessing seismoacoustic safety is proposed, accounting for both amplitude and frequency characteristics of vibrations.

Practical implementation. The results allow substantiated determination of seismoacoustically safe distances for blasting near residential buildings, accounting for the actual energy characteristics of the explosive used, prioritizing instrumental monitoring of the nearest buildings, and improving the reliability of environmental safety assessment of mining operations. The need to refine the TNT equivalence coefficient e based on the quality certificate of a specific explosive batch is substantiated.

Keywords: *mass blasting, short-delay blasting, seismoacoustic action, seismic waves, air shock wave, TNT equivalent, scaled distance, environmental safety, technical condition of buildings and structures, seismoacoustic stability of buildings and structures, anthropogenic impact, residential development.*

дата першого надходження статті до видання	10.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	20.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. A. Han, V. Boiko, V. Korobiichuk, T. Khlevniuk, O. Han, D. Bilobrov
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.