

# ТЕХНІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-6-82-1>

УДК 699.841

Бахтин А.І., Крючков А.І., Жукова Н.І.

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

## ВПЛИВ ТИПІВ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ НА СТІЙКІСТЬ ОБ'ЄКТІВ, ЩО ОХОРОНЯЮТЬСЯ

**Анотація.** У ході аналітичних та експериментальних досліджень встановлені автоковаріаційні функції та енергетичні автоспектри вхідного та вихідного імпульсів хвиль деформації для системи «грунт – фундамент» та «фундамент – вершина вежі». Проаналізовано зміну амплітуди та енергії сейсмічних коливань різних типів сейсмічних хвиль при проходженні вибухового імпульсу через фундамент та основні конструкції дослідного об'єкту. На відміну від традиційного максимального впливу поверхневих хвиль Релея в дослідженому випадку зафіксовано значно більший вплив на стійкість об'єкта сукупної дії об'ємних поперечних та поверхневих хвиль Лява. Виявлено діапазон резонансних частот сейсмічних коливань ґрунтового масиву та фундаменту дослідної конструкції. Встановлено ступінь зниження амплітуди та енергії сейсмічних коливань вихідного імпульсу (поверхня фундаменту) для системи «грунт – фундамент» та зростання коливань на вершині вежі.

**Ключові слова:** поздовжні хвилі, поперечні хвилі, поверхневі хвилі Релея, автоковаріаційна функція, енергетичний автоспектр, частота, амплітуда, фундамент, ґрунтовий масив, швидкість зміщення.

Bakhtyn Anatolii, Kryuchkov Anatolii, Zhukova Nataliia  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

## INFLUENCE OF TYPES OF SEISMIC WAVES ON THE STABILITY OF PROTECTED OBJECTS

**Summary.** The purpose of this article is to estimate the transfer, absorption and distribution of energy of explosive pulses by types of seismic waves as they pass through the rock massif and protected objects. In the course of analytical and experimental studies, the autocovariance functions and energy autospectra of the input and output pulses of deformation waves for the system "soil – foundation" and "foundation – the top of the tower" were established. The change of amplitude and energy of seismic oscillations of different types of seismic waves during the passage of the explosive pulse through the foundation and the main structures of the experimental object is analyzed. In contrast to the traditional maximum influence of Rayleigh surface waves, in the studied case a much greater influence on the stability of the object of the combined action of bulk transverse and surface Love waves was recorded. The range of resonant frequencies of seismic oscillations of the rock massif and the foundation of the experimental structure is revealed. A decrease in the amplitude and energy of seismic oscillations of the output pulse (foundation surface) for the system "soil – foundation" and an increase in oscillations at the top of the tower. For the soil-foundation system, the maximum amplitude of seismic oscillations on the foundation surface is approximately 3 times lower than the amplitude of soil oscillations at a distance of 70 m, and the energy decreased by approximately 8 times. That is, the foundation absorbed almost 90% of the energy that approached it. Studies have shown that the maximum amplitude of oscillations caused by transverse waves is 9-17 times higher than that of surface Rayleigh waves and almost 58-90 times higher than that of longitudinal waves for the topsoil and foundation surface, respectively. The largest share of energy in the analyzed case is transferred by transverse waves: about 91% for the soil mass; 85% for the foundation and 60% at the top of the tower. The practical significance of the results of the article lies in the information obtained to protect objects from the negative destructive effects of seismic waves of different types, as well as the possibility of influencing the flows and energy dissipation of explosions by changing its parameters or other engineering solutions.

**Keywords:** longitudinal waves, transverse waves, Rayleigh surface waves, autocovariance function, energy autospectrum, frequency, amplitude, soil massif, oscillation speed.

**Постановка проблеми.** Для оцінки сейсмічної безпеки об'єктів, що охороняються, важливим питанням є вивчення особливостей проходження сейсмічних хвиль через масив, їх швидкості, амплітуди та енергії. До основних потенційних та реальних загроз, які створюють масові вибухи на кар'єрах є багатофакторне ураження об'єктів, що охороняються на значних відстанях від нього. Враховуючи це, особливо актуальним є питання збереження стійкості бортів кар'єру та будівель неподалік від нього.

При розповсюдженні пружної хвилі від місця вибуху до об'єктів, що охороняються, основна

частина її енергії зосереджена в доволі вузькому діапазоні частотного спектра коливань. Ці параметри залежать від геолого-морфологічної будови, термодинамічних параметрів ділянки ґрунтового масиву, що розглядається, а також від технологічних параметрів вибуху [1; 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В гірничій справі та геомеханіці прийнято вважати максимальне значення напруження та його тривалість основними параметрами вибухового імпульсу. Керування вибуховим імпульсом здійснюється за рахунок зміни цих параметрів. Дана інформація є корисною, але її не достатньо для

точного передбачення дії вибуху в гірському масиві на об'єктах, що охороняються та обґрунтованої розробки вибухових технологій [3].

Ефективність теорії залучення теорії спектрів для дослідження вибухових явищ в різних середовищах підтверджено у деяких працях [4; 5; 6; 7].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Дослідження коваріаційних функцій та енергетичних спектрів дають достатньо інформації для оцінки дії вибухового хвилі, однак для більш детального розкриття та розуміння фізики сутності сейсмічних імпульсів та управління ними, необхідно оцінити вплив різних типів хвиль на амплітуду та енергію сумарного імпульсу, що проходить через об'єкти.

**Мета статті.** Метою цієї роботи є оцінка переносу, поглинання та розподілу енергії вибухових імпульсів по типам сейсмічних хвиль при проходженні їх через гірський масив та об'єкти, що охороняються.

Практична цінність результатів роботи полягає в отриманні інформації для захисту об'єктів від негативного руйнівного впливу сейсмічних хвиль різних типів, а також можливості впливу на потоки та дисипацію енергії вибухових імпульсів за рахунок зміни параметрів вибуху або інших інженерних рішень.

**Виклад основного матеріалу.** Для оцінки переносу та розподілу енергії вибухових імпульсів по типам сейсмічних хвиль при проходженні їх через гірський масив та об'єкти, що охороняються використані експериментальні заміри зміщень ( $u$ ) по осі  $X$  на поверхні ґрунту (70 м від фундаменту), зміщень поверхні фундаменту та вершині однієї з веж [8].

Традиційний критерій стійкості об'єкта, що охороняється, залежить від швидкості зміщення ( $\dot{u}$ ). За допустиме динамічне навантаження на силосні вежі була прийнята швидкість зміщення по одній з компонент – 0,2 см/с [8]. Враховуючи це, були перераховані сейсмограми зміщення ( $u$ ) у сейсмограми швидкості деформації (рис. 1).

Припустимо, що неперервні цифрові дані  $\dot{u}(t)$ ,  $t = 0, \dots, N$  ( $N$  – кількість дискретних точок

вибірки) відповідають значенням дискретного сигналу  $\dot{u}_i(t)$ . Позначимо швидкість зміщення вхідного імпульсу (коливання ґрунту на відстані 70 м від фундаменту)  $\dot{u}_z$ , а вихідного (поверхня фундаменту) через  $\dot{u}_\phi$  для системи «ґрунт – фундамент». В свою чергу для системи «фундамент – вершина вежі» сигнал на поверхні фундаменту  $\dot{u}_\phi$  буде вхідним, а сигнал на вершині вежі вихідним, позначимо його через  $\dot{u}_e$ . Методика розрахунку вибіркової оцінки автоковаріаційних функцій та енергетичних амплітудних автоспектрів взята з роботи [9]. Вибіркова оцінка коваріаційної функції в цьому випадку буде мати вигляд (рис. 2):

$$c_z(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} [(\dot{u}_{zt} - \bar{\dot{u}}_z)(\dot{u}_{zt+k} - \bar{\dot{u}}_z)]; \quad (1)$$

$$c_\phi(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} [(\dot{u}_{\phi t} - \bar{\dot{u}}_\phi)(\dot{u}_{\phi t+k} - \bar{\dot{u}}_\phi)]; \quad (2)$$

$$c_e(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} [(\dot{u}_{et} - \bar{\dot{u}}_e)(\dot{u}_{et+k} - \bar{\dot{u}}_e)], \quad (3)$$

де  $c_z(k)$ ,  $c_\phi(k)$ ,  $c_e(k)$  – вибіркові оцінки автоковаріаційних функцій швидкості зміщення частинок масиву під дією вибухового імпульсу на відстані 70 м від фундаменту, поверхні фундаменту та вершині однієї з веж відповідно.

Вибіркова оцінка енергетичних автоспектрів  $G_z(f)$ ,  $G_\phi(f)$ ,  $G_e(f)$  швидкості зміщення частинок під дією вибухового імпульсу розраховується за рівняннями 4-6 та представлена на рис. 3 та 4.

$$G_z(f) = 2 \left[ c_z(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} \left( \omega_p(k) \cdot c_z(k) \cdot \cos \left( \frac{\pi \cdot f \cdot k}{F} \right) \right) \right]; \quad (4)$$

$$G_\phi(f) = 2 \left[ c_\phi(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} \left( \omega_p(k) \cdot c_\phi(k) \cdot \cos \left( \frac{\pi \cdot f \cdot k}{F} \right) \right) \right]; \quad (5)$$

$$G_e(f) = 2 \left[ c_e(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} \left( \omega_p(k) \cdot c_e(k) \cdot \cos \left( \frac{\pi \cdot f \cdot k}{F} \right) \right) \right]; \quad (6)$$

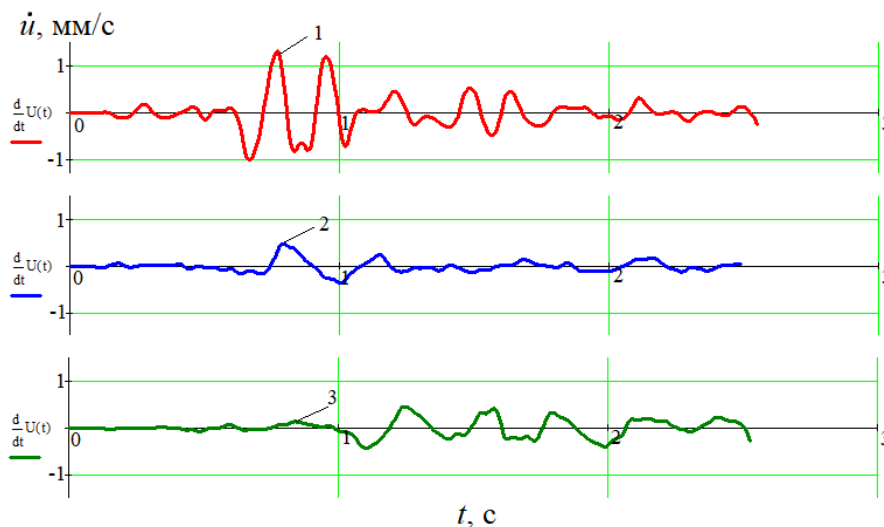
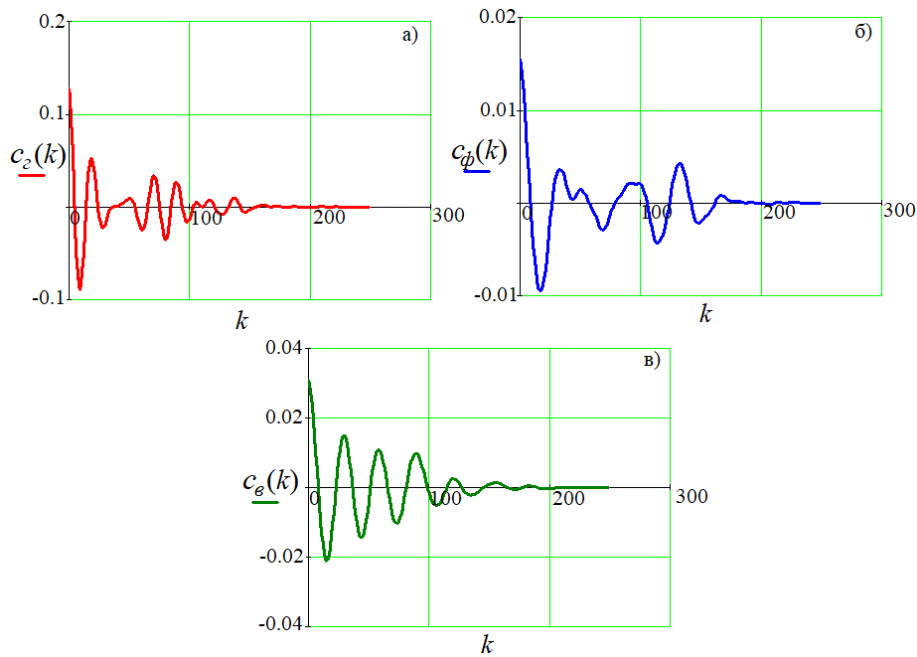


Рис. 1. Осцилограми вибухового імпульсу:

1 – швидкість зміщення частинок ґрунту на відстані 70 м від фундаменту; 2 – швидкість зміщення частинок на поверхні фундаменту; 3 – швидкість зміщення частинок на вершині однієї із силосних веж.

Джерело: розроблено авторами за даними [8]



**Рис. 2.** Вибіркові оцінки автоковаріаційних швидкості зміщення частинок під дією вибухового імпульсу ґрунту на відстані 70 м від фундаменту (а), поверхні фундаменту (б) та вершини однієї з веж (в)

Джерело: розроблено авторами

де  $f$  – частота сейсмічних коливань, Гц;  $\omega_p(k)$  – коваріаційне вікно;  $L$  – ширина смуги частот коваріаційного вікна;  $F = 2L$ .

В даній роботі використовується коваріаційне вікно Парзена для максимального збереження інформації при низькочастотних коливаннях [9]:

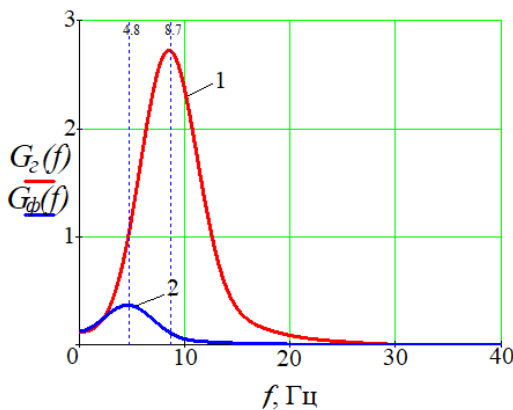
$$\omega_p(k) = \begin{cases} 1 - \frac{6k^2}{L^2} \left(1 - \frac{k}{L}\right), & 0 \leq k \leq \frac{L}{2} \\ 2 \left(1 - \frac{k}{L}\right)^3, & \frac{L}{2} \leq k \leq L. \end{cases} \quad (7)$$

Однією з основних функцій фундаменту є зниження амплітуди, а також часткове поглинання сейсмічних коливань, які через нього проходять. Для системи «ґрунт – фундамент» амплітуда коливань вихідного імпульсу

(поверхня фундаменту) знизилася приблизно в 3 разів. Для оцінки розподілу та поглинання енергії проінтегруємо рівняння (4-6) по частоті в діапазоні від 0 до 25 Гц. Аналіз отриманих результатів показав, що енергія на поверхні фундаменту нижча у 8,23 рази ніж на його вході. Це свідчить про те, що фундамент дослідного об'єкта поглинув близько 88 % сейсмічної енергії, яка до нього підійшла.

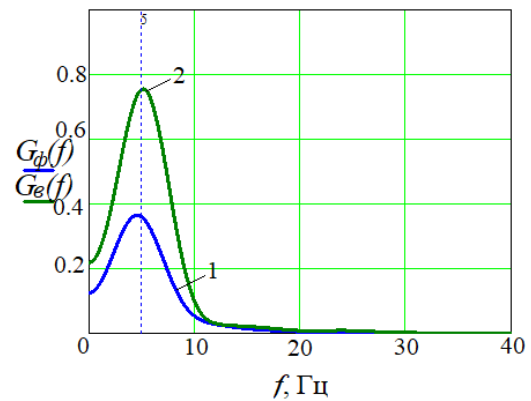
Як впливає з аналізу енергетичних амплітудних спектрів системи «ґрунт – фундамент» діапазон частот 5..9 Гц є близьким до резонансу (рис. 3). В цьому діапазоні спостерігається збільшення амплітуди та енергії сейсмічних коливань та утворення мікротріщин у фундаменті.

Амплітуда та енергія коливань на вершині вежі також більша в 2 рази в порівнянні із по-



**Рис. 3.** Вибіркові оцінки енергетичних амплітудних автоспектрів вхідного (1) та вихідного імпульсів (2) для системи «ґрунт – фундамент»

Джерело: розроблено авторами



**Рис. 4.** Вибіркові оцінки енергетичних амплітудних автоспектрів вхідного (1) та вихідного імпульсів (2) для системи «фундамент – вершина вежі»

Джерело: розроблено авторами

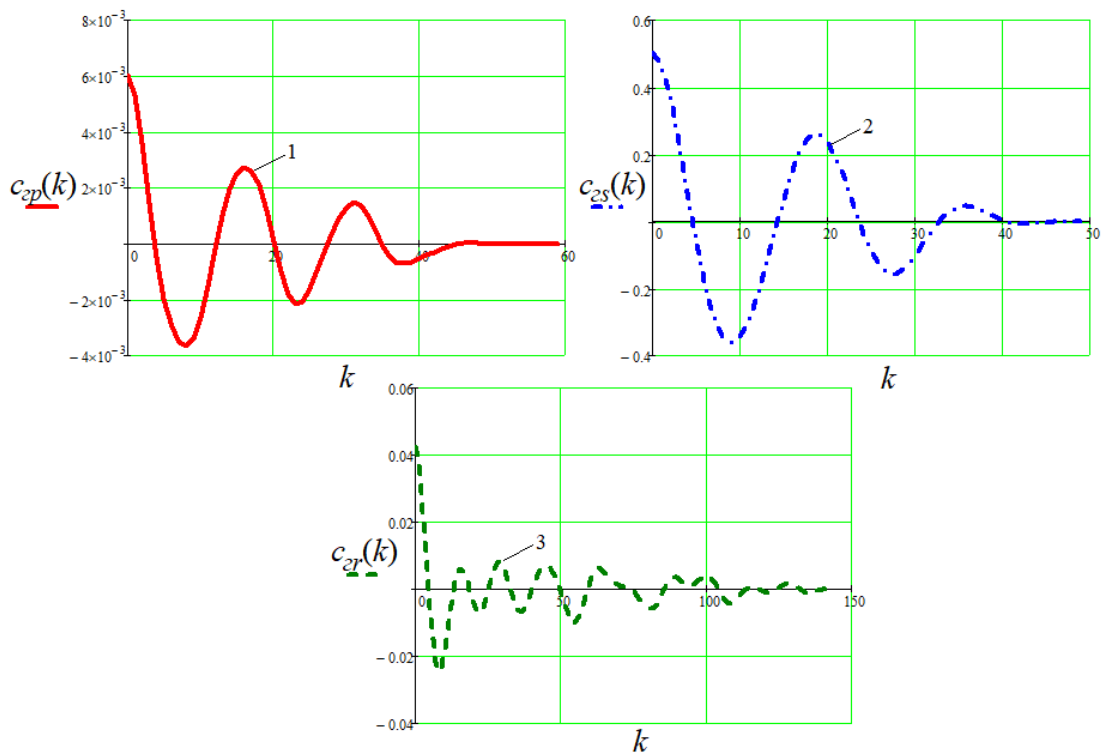


Рис. 5. Вибіркові оцінки автоковаріаційних функцій швидкості зміщення частинок ґрунту, що викликані повздовжніми (1), поперечними (2) та поверхневими хвилями Релея (3)

Джерело: розроблено авторами

верхню фундаменту для системи «фундамент – вершина вежі».

Це свідчить про те, що за рахунок значної висоти силосних веж (43 м) відбувається їх розкачування під дією вибухового імпульсу. Максимальна амплітуда коливань вершини вежі (0,754) та поверхні фундаменту (0,364) спостерігається на частоті 5 Гц. Тобто фундамент та вежі реагують на вибуховий імпульс практично як цілісний об'єкт.

Спектральний аналіз сумарного вибухового імпульсу дає якісну та в більшості випадків достатню інформацію для оцінки дії вибухової хвилі та прийняття рішень по її зменшенню. Однак для більш широкого розуміння умов дисипації енергії вибухового імпульсу необхідно провести спектральний аналіз за типами хвиль. Для цього необхідно розбити значення осцилограм вибухового імпульсу за типами сейсмічних хвиль та провести аналогічну оцінку, що описана вище (рівняння 1-7).

На рис. 5 та 6 представлені вибіркові оцінки автоковаріаційних функцій та енергетичних амплітудних автоспектрів пружних сейсмічних хвиль: повздовжні (1), поперечні (2) та поверхневі хвилі Релея (3) для поверхні ґрунту. Аналогічні розрахунки проведені для поверхні фундаменту та вежі (табл. 1).

При розповсюдженні коливань частинки середовища не переміщуються із хвилею, що розповсюджується, а коливаються навколо своїх положень рівноваги. Повздовжні хвилі ( $P$ ) – послідовні деформації стиснення і розтягу, що розповсюджуються в напрямку руху хвилі. Поперечні хвилі ( $S$ ) – деформації зміщення, що розповсюджуються перпендикулярно до руху

хвилі. Поряд з повздовжніми і поперечними існують декілька типів поверхневих хвиль, з яких при дослідженні гірських порід найбільшого використання знаходять хвилі Релея ( $R$ ). Хвилі Релея пов'язані з пружними коливаннями, що розповсюджуються уздовж границі твердого простору з повітрям чи рідиною і швидко затухають з глибиною.

Для оцінки переносу та розподілу енергії вибухових імпульсів по типах сейсмічних хвиль при проходженні їх через гірський масив проінтегруємо їх енергетичні спектральні функції по частоті в діапазоні від 0 до 45 Гц.

Максимальна амплітуда коливань, викликаних поперечними хвилями  $S$  у 9-17 разів вища ніж у поверхневих хвиль Релея  $R$  та майже в 58-90 разів вища ніж у повздовжніх хвиль  $P$  для верхнього шару ґрунту та поверхні фундаменту відповідно.

Найбільша доля енергії в проаналізованому випадку переноситься поперечними хвилями: близько 91% для ґрунтового масиву; 85% для фундаменту та 60% на вершині вежі.

Висока амплітуда та енергія коливань (табл. 1), що викликані поперечними пружними хвилями  $S$  може вказувати на те, що в цьому спектрі коливань окрім об'ємних поперечних хвиль також присутні хвилі Лява, тобто поверхневі хвилі з поперечною горизонтальною поляризацією.

#### Висновки і пропозиції.

1) Для системи «ґрунт – фундамент» амплітуда сейсмічних коливань вихідного імпульсу (поверхня фундаменту) нижча за амплітуду коливань ґрунту на відстані 70 м від дослідного об'єкта приблизно в 3 рази, а енергія знизилася приблизно

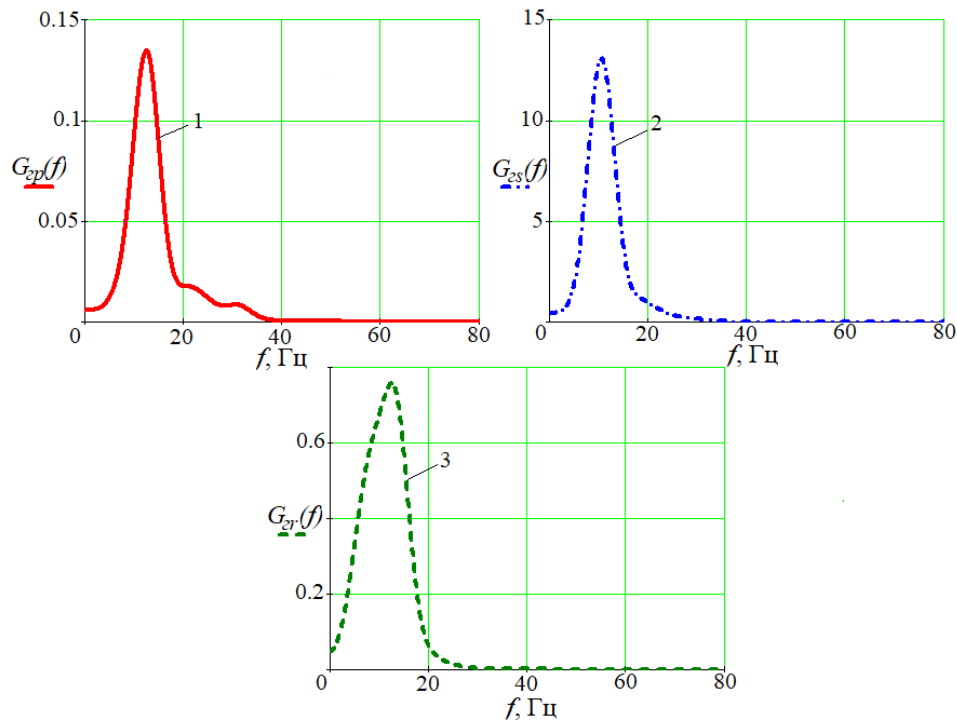


Рис. 6. Вибіркові оцінки енергетичних автоспектрів пружних сейсмічних хвиль: повздовжні (1), поперечні (2) та поверхневі хвилі Релея (3)

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1

Частотно-амплітудна характеристика вибухового імпульсу  
за типами сейсмічних хвиль на різних ділянках спостереження

Точка спостереження	Тип сейсмічної хвилі	Максимальна амплітуда коливань $\dot{y}$ , мм/с	Частота при максимальній амплітуді коливань, Гц	Частина енергії у сумарному вибуховому імпульсі, %
Поверхня ґрунту на відстані 70 м від фундаменту	Повздовжні $P$	0,367	12,52	1,1
	Поперечні $S$	3,61	10,69	91,3
	Поверхневі хвилі Релея $R$	0,87	12,59	7,6
Вершина фундаменту	Повздовжні $P$	0,28	5,1	4,8
	Поперечні $S$	1,17	5,76	85,3
	Поверхневі хвилі Релея $R$	0,39	5,02	9,9
Вершина вежі	Повздовжні $P$	0,17	5,35	1,7
	Поперечні $S$	1,21	5,25	60,6
	Поверхневі хвилі Релея $R$	1,0	6,16	37,6

Джерело: розроблено авторами

у 8 рази. Це свідчить про те, що фундамент дослідного об'єкта поглинув основну частину сейсмічної енергії (88 %), яка до нього підійшла.

2) Діапазон частот 5-9 Гц є резонансним. В цьому діапазоні, частота коливань фундаменту дослідного об'єкта близька до частоти коливань вхідного імпульсу, що призводить до збільшення амплітуди та енергії сейсмічних коливань, деформації ґрунту, просідання фундаменту та утворення у ньому мікротріщин.

3) За рахунок суттєвої висоти силосних веж (43 м), під дією вибухового імпульсу відбувається

їх розкачування, амплітуда та енергія коливань на вершині вежі більша в 2 рази в порівнянні із поверхнею фундаменту. Фундамент та вежі реагують на вибуховий імпульс як цілісний об'єкт, це підтверджується тим що, максимальна амплітуда коливань вершини вежі (0,87) та поверхні фундаменту (0,6) спостерігається на частоті 5 Гц.

4) На відміну від традиційного максимального впливу поверхневих хвиль Релея в дослідженому випадку зафіксовано значно більший вплив на стійкість об'єкта сукупної дії об'ємних поперечних та поверхневих хвиль Лява.

## Список літератури:

1. Крючков А.І., Бахтин А.І. Опис форми, розповсюдження та поглинання вибухового імпульсу в гірському масиві. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2019. № 23. С. 18–27. DOI: 10.30929/2074-1537.2019.1.18-27
2. Крючков А.І., Бахтин А.І. Закономірність швидкості розповсюдження повздовжніх сейсмічних хвиль в залежності від температури та вологості гірських порід. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»*. 2017. № 33. С. 5–9. DOI: 10.20535/2079-5688.0.33.100620
3. Нагорный В.П., Денисюк И.И. Спектры и их приложения к задачам взрывного дела. Київ, 2010. 185 с.
4. Блохин Д.И., Одинцев В.Н., Шейнин В.И. Результаты спектрального анализа данных, характеризующих особенности распределения деформаций пород вблизи подземных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2007. № 2. С. 146–152.
5. Лемешко В.А., Бойко В.В., Кузьменко А.А., Хлевнюк Д.В. Дискретизация аналогового сигнала от сейсмического приемника SM-3 при проведении промышленного взрыва. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»*. 2015. № 27. С. 97–104.
6. Нургалиева Н.Г., Нургалиев Д.К. Спектральный анализ рядов литологических параметров в разрезах, содержащих перерывы. *Ученые записки казанского государственного университета. Естественные науки*. 2008. № 150. С. 157–167.
7. Ulrych T.J., Bishop T.N. Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1975. № 13. P. 183–200.
8. Кабаков В.А., Овсянников П.И., Помохов И.Г. Сейсмическое действие взрывов на силосные башни Новокарагандинского цементного завода. *Горное дело: Сейсмика промышленных взрывов*. 1983. № 85/42. С. 174–178.
9. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Москва : Мир, 1972. Т. 2. 285 с.

## References:

1. Kriuchkov, A.I., & Bakhtyn, A.I. (2019). Opys formy, rozpovsiudzhennia ta pohlynannia vybukhovoho impulsu v hirs'komu masyvi [description of the form, dissemination and damping of the explosive impulse in the rocks massif]. *Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnolohii hirnychoho vyrobnytstva*, vol. 23, pp. 18–27. DOI: 10.30929/2074-1537.2019.1.18-27
2. Kriuchkov, A.I., & Bakhtyn, A.I. (2017). Zakonomirnist shvydkosti rozpovsiudzhennia povzdovzhnykh seismichnykh khvyly v zalezhnosti vid temperatury ta volohosti hirs'kykh porid [The pattern of velocity expansion of the longitudinal seismic waves depending on the temperature and humidity of rock]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekh-nichnyi instytut". Serii "Hirnytstvo"*, vol. 33, pp. 5–9. DOI: 10.20535/2079-5688.0.33.100620
3. Nagornyy, V.P., & Denisyuk, I.I. (2010). *Spektry i ih prilozeniya k zadacham vzryivnogo dela* [Spectra and their applications to explosive tasks]. Kiev: NAN Ukrainyi, Institut geofiziki im. S.I. Subbotina. (in Ukrainian)
4. Blokhin, D.I., Odintsev, V.N., & Sheynin, V.I. (2007). Rezultaty spektralnogo analiza dannykh, kharakteryzuyushchikh osobennosti raspredeleniya deformatsiy porod vblizi podzemnykh vyrabotok [The results of spectral analysis of data characterizing the features of the distribution of deformations of rocks near underground workings]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, vol. 2, pp. 146–152.
5. Lemeshko, V.A., Boiko, V.V., Kuzmenko, A.A., & Khlevniuk, D.V. (2015). Diskretizatsiya analogovogo signala ot seysmicheskogo priyemnika SM-3 pri provedenii promyshlennogo vzryiva [amplifying analog signal from a seismic receiver sm-3 during the industrial explosion]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekh-nichnyi instytut". Serii "Hirnytstvo"*, vol. 27, pp. 97–104.
6. Nurgalieva, N.G., & Nurgaliev, D.K. (2008). Spektralnyy analiz ryadov litologicheskikh parametrov v razrezakh soderzhashchikh pereryvy [Spectral Analysis of Lithological Parameter Series in the Interruption Containing Sections]. *Uchenyye zapiski kazanskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennyye nauki*, vol. 150, pp. 157–167.
7. Ulrych, T.J., & Bishop, T.N. (1975). Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition. *Rev. Geophys. Space Phys.*, vol. 13, pp. 183–200.
8. Kabakov, V.A., Ovsyannikov, P.I., & Pomogov, I.G. (1983). Seysmicheskoe deystvie vzryivov na silosnyie bashni Novokaragandinskogo tsementnogo zavoda [Seismic effect of explosions on silos of Novokaraganda cement plant]. *Gornoye delo: Seysmika promyshlennykh vzryivov*, vol. 85/42, pp. 174–178.
9. Dzhenkins, G., & Vatts, D. (1972). *Spektralnyy analiz i ego prilozeniya* [Spectral analysis and its applications]. Moskva: Mir. (in Russian)