

УДК 622.235:550.346:624.042.7

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-19>

РОЗРОБКА МЕТОДУ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ НА БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ

Бойко Віктор Вікторович,

доктор технічних наук, професор,

завідувач Н-ДЛПСБТВ

Інституту гідромеханіки Національної академії наук України

ORCID ID: 0000-0003-3443-1688

Ган Анатолій Леонідович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри геоінженерії

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

старший науковий співробітник Н-ДЛПСБТВ

Інституту гідромеханіки Національної академії наук України

ORCID ID: 0000-0003-0832-1338

Хлевнюк Тамара Вікторівна,

кандидат технічних наук,

старший науковий співробітник Н-ДЛПСБТВ

Інституту гідромеханіки Національної академії наук України

ORCID ID: 0000-0001-8024-1864

Ган Олена Валеріївна,

кандидат технічних наук,

старший викладач кафедри геоінженерії

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

старший науковий співробітник Н-ДЛПСБТВ

Інституту гідромеханіки Національної академії наук України

ORCID ID: 0000-0003-0739-9600

У статті запропоновано сучасний експериментальний метод щодо ідентифікації сейсмічних хвиль, які впливають на будівлі та споруди під час техногенних вибухів, пов'язаних з вибуховими речовинами їх виготовленням і використанням при проведенні вибухових робіт на кар'єрах та воєнних вибухів. Метод базується на аналізі часових та частотних характеристик фрагментів сейсмограм, що дає змогу з високою точністю розмежовувати об'ємні (поздовжні та поперечні) й поверхневі хвилі з небезпечними показниками для відповідних будівель і споруд, зокрема при збігу та накладанні власних параметрів коливань, здатних викликати резонансні явища, зниження несучої здатності конструкцій та небезпечні деформації інженерних об'єктів. Установлено чіткі частотні критерії розмежування об'ємних та поверхневих хвиль, які свідчать, що об'ємні хвилі характеризуються частотами понад 20 Гц, поверхневі хвилі – частотами до 20 Гц. Розроблено послідовність спектрального аналізу різних часових фрагментів для уточнення часових границь між різними типами хвиль.

На основі часових, частотних та амплітудних критеріїв розроблено алгоритм ідентифікації сейсмічних хвиль, який містить визначення швидкостей Р- та S-хвиль, виділення часових фрагментів записів та спектральний аналіз домінантних частот. Апробація методу проведена при виконанні вибухових робіт на Демне-Добрянському кар'єрі, за допомогою якого встановлено часові границі приходу різних хвиль та відокремлені фрагменти з потенційно небезпечними параметрами. Запропонований метод може застосовуватися як для моніторингу споруд, визначення технічного стану, так і для оцінки екологічних ризиків, пов'язаних із сейсмічним впливом вибухів.

Розроблений метод дає змогу фіксувати фрагменти сейсмограми з частотами, близькими до власних коливань охоронного об'єкта, виявляти максимальні швидкості коливань для кожного типу хвиль окремо та прогнозувати найбільш небезпечні фази сейсмічного впливу.

Ключові слова: сейсмічні хвилі, спектральний аналіз, сейсмостійкість, вибухові впливи, кар'єр, моніторинг будівель та споруд, екологічна безпека.

Boiko Viktor, Han Anatolii, Khlevnyk Tamara, Han Olena. Development of a method for identifying seismic waves affecting buildings and structures

The article proposes a modern experimental method for identifying seismic waves affecting buildings and structures during man-made explosions associated with explosives, their manufacture and use blasting methods in open-pit mine and military explosions. The method is based on analysing the time and frequency characteristics of seismogram fragments, which enables high-precision differentiation between body waves (longitudinal and transverse) and surface waves with potentially dangerous parameters for engineering structures. Such parameters become critical when the natural vibration frequencies of buildings coincide or overlap with the dominant frequencies of the waves, which may cause resonance phenomena, reduce structural bearing capacity, and lead to hazardous deformations. Clear frequency criteria for distinguishing body and surface waves have been established: body waves are characterized by frequencies above 20 Hz, while surface waves exhibit frequencies below 20 Hz. A sequential spectral analysis of time-separated fragments has been developed to refine the temporal boundaries between different wave types.

Based on time-, frequency- and amplitude-based criteria, an algorithm for seismic wave identification has been developed. It includes determining the velocities of P- and S-waves, isolating time fragments of the recorded signal, and performing spectral analysis of dominant frequencies. The method was tested during blasting operations at the Demne-Dobryansky open-pit mine, allowing the determination of arrival times for different types of waves and the identification of fragments with potentially dangerous characteristics. The proposed method can be applied both to structural monitoring and technical condition assessment, as well as to evaluating environmental risks associated with the seismic impact of explosions.

The developed approach also makes it possible to detect seismogram fragments with frequencies close to the natural oscillations of the protected object, record maximum vibration velocities for each type of wave, and predict the most hazardous phases of seismic action.

Key words: seismic waves, spectral analysis, seismic resistance, explosion impact, open-pit mine, structural monitoring, environmental safety.

Вступ. Моніторинг технічного стану будівель і споруд за їх динамічними характеристиками посідає важливе місце серед сучасних методів діагностики та отримує дедалі більше поширення як у світовій, так й у вітчизняній практиці. Знання параметрів власних форм коливань конструкцій є необхідною умовою при визначенні їх сейсмостійкості. Вимоги щодо натурного визначення цих параметрів для споруд, які перебувають у сейсмічних зонах, закладено в державних нормах України ДБН В.1.1-12:2006 «Будівництво в сейсмічних районах України» [1].

Застосування вибухових технологій у геоінженерії при розмінуванні територій, проведенні об'ємних вибухів, ущільненні ґрунтового масиву під забудову, злітних смуг на польових лєтовіщах а також вибухи, спричинені ураженням різних типів ракет та снарядів, суттєво впливають на технічний стан наявних будівель та споруд [2–5]. Такі хвильові збурення характеризуються повторюваністю та періодичністю, що може спричинити утворення резонансних явищ, які також можуть суттєво знизити несучу здатність конструкцій [6].

Особливу увагу слід приділити вивченню взаємодії поздовжніх (P), поперечних (S) та поверхневих (R) хвиль у різних типах ґрунтів, а також дослідженню механізмів їх поширення під час техногенних впливів від таких вибухів. Відомо, що саме частотні та часові параметри коливань є ключовими індикаторами потенційної небезпеки для конструкцій, що можуть спричинити втрату їх несучої здатності та розвиток деформацій.

Визначення фактичних частот, форм та декрементів власних форм коливань будівель і споруд є одним з основних параметрів при впливі на них динамічних навантажень від техногенних вибухів цивільного та воєнного характерів. Особливу актуальність це питання набуває при вибухах поблизу об'єктів інфраструктури, де необхідно контролювати вплив сейсмічних хвиль на будівлі та споруди.

Важливим додатковим аспектом при аналізі сейсмічних коливань, спричинених техногенними та воєнними вибухами, є їх вплив на навколишнє природне середовище. Повторювані хвильові збурення можуть призводити до зміни напружено-деформованого стану ґрунтового масиву, порушення структурно-механічних властивостей порід і формування тріщинуватості, що знижує стійкість геологічного середовища. У районах з розвиненими водоносними горизонтами вібраційні навантаження здатні спричиняти перерозподіл підземних вод, локальну фільтрацію або зсуви дрібнодисперсних частинок. Це, своєю чергою, може впливати на якість підземних вод та прискорювати процеси ерозії. Для територій із чутливими екосистемами характерними є додаткові ризики, зокрема порушення середовища існування фауни, зміна міграційних шляхів та акустичний стрес для живих організмів. Урахування екологічних наслідків є необхідною умовою комплексної оцінки безпеки вибухових робіт і визначення допустимих параметрів сейсмічних впливів на прилеглі природні системи.

Постановка проблеми. При проведенні вибухових робіт на гірничих підприємствах, що розташовані поблизу або в межах населених пунктів, зазнають систематичного динамічного впливу прилеглих будівлі та споруди.

Під час аналізу отриманих результатів промислових вибухів основна увага зазвичай приділяється поверхневим хвилям, оскільки вони мають більші періоди і часто більші амплітуди ніж об'ємні хвилі, які й створюють значну небезпеку для охоронних об'єктів. Крім того, об'ємні хвилі також можуть становити серйозну загрозу, особливо коли вони спричиняють резонансні явища в конструкціях будівель і споруд.

Класичні методи визначення форм власних коливань шляхом вимірювання амплітуд вільних або вимушених коливань не дають результату бажаної точності, особливо при згущенні власних частот. Для визначення зміни форми коливання необхідно виконувати вимірювання прогинів розмірністю 0,001 мм та менше, що практично реалізується дуже складно і при значних похибках.

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування методу ідентифікації сейсмічних хвиль для визначення небезпечних часових і частотних характеристик на будівлі і споруди за результатами моніторингу техногенних вибухів.

Основним завданням при оцінці впливу сейсмічних коливань на будівлі та споруди є необхідність точної ідентифікації поздовжніх (Р-хвиль), поперечних (S-хвиль) та поверхневих (R-хвиль) компонентів у загальній сейсмограмі для визначення фрагментів з небезпечними часовими й частотними характеристиками.

Методи та методики дослідження. Комплексне поєднання: експериментального дослідження параметрів за допомогою апаратурних приладів щодо реєстрації сейсмічних та ударно-повітряних хвиль техногенних вибухів; використання графоаналітичного методу та методу математичної статистики при обробці експериментальних даних; з теоретичних методів використано логічний, гіпотетичний, натурного моделювання, розрахунково-й графо-аналітичний, а також метод математичної статистики.

Результати дослідження. На осцилограмі сейсмоколивань (залежність швидкості коливань частинок середовища від часу) послідовно фіксують такі типи сейсмічних хвиль з характеристиками:

- поздовжня хвиля (Р-хвиля) зі швидкістю V_p ;
- поперечна хвиля (S-хвиля) зі швидкістю V_s ;
- поверхнева хвиля (R-хвиля) зі швидкістю V_r .

Швидкості цих хвиль пов'язані такими співвідношеннями:

$$V_p = k_1 \cdot V_s \quad (1)$$

$$V_r = k_2 \cdot V_s \quad (2)$$

де k_1 , k_2 – коефіцієнти, які залежать від типу порід: $k_1 = 1,4 \div 1,5$ – для осадових порід, $k_1 = 1,7 \div 1,9$ – для вивержених та метаморфічних порід, $k_2 = 0,9184$ (теоретичне значення).

Ці швидкості залежать від модуля пружності середовища E , коефіцієнта Пуассона ν , модуля зсуву G та щільності ґрунту ρ .

На практиці ґрунтовий масив є неоднорідним, анізотропним, має тріщини та інші дефекти, що ускладнює ідентифікацію окремих типів хвиль. У результаті вимірювань на сейсмограмі (спектрограмі) отримуємо повну характеристику розповсюдження всіх сейсмічних коливань залежно від відстані до джерела збудження (вибуху).

Для апробації запропонованого методу проведено дослідження ідентифікації сейсмічних хвиль на будівлі та споруди на прикладі вибуху в Демне-Добрянському кар'єрі, параметри якого наведено в таблиці 1. Для цього на різних відстанях від джерела збудження (вибуху блока) розташовані датчики. Схему розташування та параметри датчиків наведено на рис. 1 та табл. 2.

Таблиця 1
Основні показники масового вибуху

Показники	Демне-Добрянський кар'єр блок № 29, гор. +76,5
Діаметр свердловини, мм	180
Кількість свердловин	57
Сітка свердловин, м	4,3 x 4,3
Глибина свердловини, м	14,0–16,3
Забивка, м	4,3–4,5
Перебур, м	0,5–1,0
Довжина заряду, м	10,2–12,0
Типи вибухових матеріалів	Анемікс
Q_L – погонна маса ВР свердловинного заряду, кг/м	28
Маса заряду в одній свердловині, кг	285–330
Питомі витрати ВР, кг/м ³ , q	1,15
Щільність ВР, г/см ³ , γ	1,18–1,21
Загальна маса зарядів, кг	16325
Об'єм серії, м ³	14428
Система ініціювання	НСІ
Схема КСП	Діагонально врубів
Кількість ступенів сповільнення	51
Інтервал сповільнення, мс	42*25
Маса заряду в максимальній групі, кг	755
Час ініціювання всього блоку, мс	621 + 200
Відношення загальної маси зарядів до часу ініціювання блоку, кг/мс	19,88

Для реєстрації розповсюдження сейсмічних хвиль застосовували сейсмовимірювальний комплекс, який містить стандартні однокомпонентні електромагнітні датчики СМ-2, СМ-3 та СМ-3В (табл. 2), швидкісний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) Е14-440 та персональний комп'ютер (notebook) для запису та обробки даних.

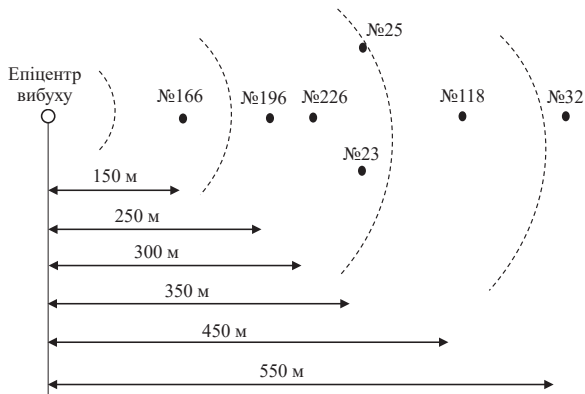


Рис. 1. Схема розташування датчиків вимірювання сейсмічних коливань

Для реєстрації сейсмічних коливань датчики СМ-3 установлювались у вертикальному положенні на поверхні ґрунту за умови жорсткого контакту (заглиблені в ґрунт). З підходом сейсмічної хвилі до поверхні ґрунт починає переміщуватися. Разом із ґрунтом зміщується постійний магніт, жорстко зв'язаний з корпусом сейсмоприймача. Інертна маса (індукційна котушка, закріплена на пружинах) деякий час через інерцію залишається у фіксованому положенні. При цьому витки котушки індуктивності перетинають поле постійного магніту з магнітним потоком Φ та індукцією B , завдяки чому виникає електрорушійна сила E . Частота електрорушійної сили відповідає частоті коливання

сейсмічної хвилі, а амплітуда E пропорційна амплітуді коливань цієї хвилі. Далі електричні сигнали подають на персональний комп'ютер (ПК) через 16-канальний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) фірми L-Card.

Схема розташування датчиків та система вимірювань були такими: перший датчик СМ-3 № 166 (канал 1) розташований на відстані 150 м від джерела збудження (блоку підривання) та реєстрував вертикальний (Z) складник сейсмічних коливань; другий датчик СМ-3 № 196 (канал 2) розташований на відстані 250 м (100 м від попереднього), реєстрував вертикальний (Z) складник; третій датчик СМ-2 № 226 (канал 3) – на відстані 300 м (50 м від попереднього), реєстрував вертикальний (Z) складник; четвертий та п'ятий датчики СМ-3В №25 та №23 (канали 4, 6) – на відстані 350 м, реєстрували горизонтальні складники (X) та (Y) сейсмічних коливань; шостий датчик СМ-3 № 118 (канал 7) – на відстані 450 м, реєстрував вертикальний (Z) складник; сьомий датчик СМ-3В № 32 (канал 8) – на відстані 550 м, реєстрував теж вертикальний (Z) складник сейсмічних коливань.

Приклади отриманих осцилограм у результаті проведених експериментальних вимірювань на Демне-Добрянському кар'єрі по Z-складникам короткоуповільненого вибуху наведено на Рис. 2, а на проміжку часу від 0 до 0,4 с – на Рис. 3.

Розроблена методика ідентифікації хвиль передбачає таку послідовність. Спочатку, на першому етапі, визначається швидкість позовжньої хвилі V_p . За характерними точками на сейсмограмі визначається час проходження позовжньої хвилі між двома такими датчиками (наприклад, від датчика № 166 до датчика № 196 на відстані 100 м). Знаючи відстань між датчиками та час розповсюдження хвилі, вираховується швидкість V_p . За відомою відстанню

Таблиця 2

Параметри датчиків для реєстрації сейсмічних хвиль

№ з/п	Тип датчика	Номер датчика	Номер каналу	Власна частота, Гц	Ступінь затушення	Коефіцієнт перетворення, В/(м/с)	Маса, кг	Відстань до вибуху, м	Складник хвилі
1	СМ-3	166	1	20	0,55	18	0,22	150	Z
2	СМ-3	196	2	20	0,55	18	0,22	250	Z
3	СМ-2	226	3	20	0,55	18	0,22	300	Z
4	СМ-3В	25	4	20	0,55	18	0,22	350	X, Y
5	СМ-3В	23	6	20	0,55	18	0,22	350	X, Y
6	СМ-3	118	7	20	0,55	18	0,22	450	Z
7	СМ-3В	32	8	20	0,55	18	0,22	550	Z

між джерелом збудження (блоком підривання) та першим датчиком визначається точка вибуху по часовій осі.

Потім, на другому етапі, виконується розрахунок приблизного часу приходу поперечної хвилі V_s за формулою (1) залежно від типу порід та приблизний час її приходу до першого датчика.

І в кінці, на третьому етапі, виконується спектральний аналіз фрагментів сейсмограми, а саме послідовний спектральний аналіз різних часових фрагментів запису для точної ідентифікації типів хвиль за їх частотними характеристиками.

Наведемо отримані результати досліджень запропонованої методики ідентифікації сейсмічних хвиль на будівлі та споруди на прикладі вибуху в Демне-Добрянському кар'єрі. Отримані фрагменти осцилограм: перший фрагмент – зона позовдвжньої хвилі (рис. 4); другий

фрагмент – перехідна зона (рис. 5); третій фрагмент – зона без позовдвжньої хвилі (рис. 6); четвертий фрагмент – пізніші фази сейсмічних коливань (рис. 7); повний сигнал від датчику № 166 (рис. 8).

Виокремимо ще декілька зон, щоб перевірити, чи правильно ми знайшли час вступу поперечної хвилі. Візьмемо ще один період коливань (рис. 5).

Виберемо зону без першого періоду, тобто без великого складника позовдвжньої хвилі (рис. 6).

Наступний фрагмент із запису не має фрагмента № 2 (рис. 7).

Наостанок візьмемо спектр з усього сигналу від сенсора № 166, тобто з каналу № 1 (див. рис. 8).

На спектрограмах рис. 7б і 8б переважають частоти до 20 Гц, тоді як на осцилограмах рис. 4б, 5б і 6б переважають частоти понад 20 Гц.

Перший фрагмент (рис. 4) містить період від приходу позовдвжньої хвилі до очікуваного

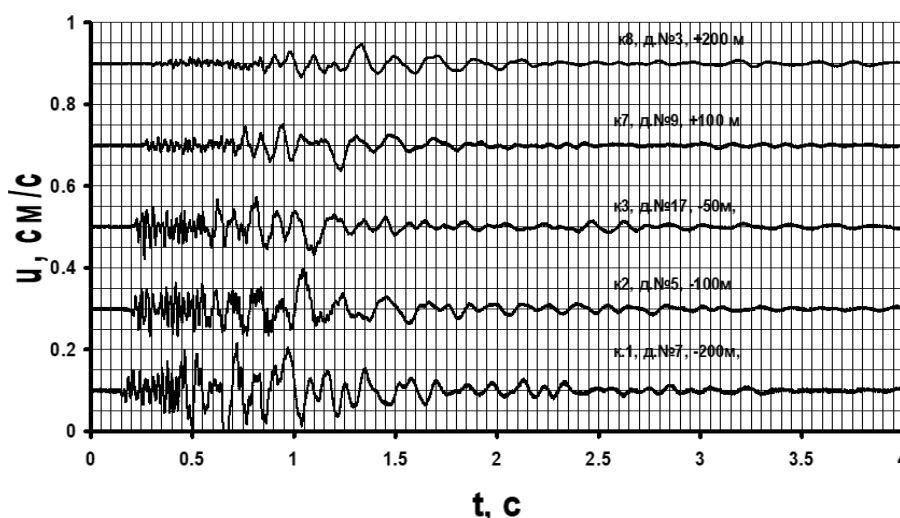


Рис. 2. Осцилограма по Z-складникам короткостовільного вибуху на Демне-Добрянському кар'єрі

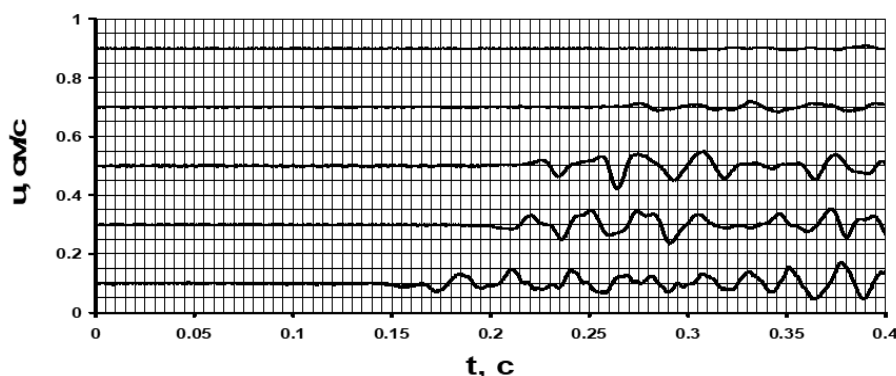
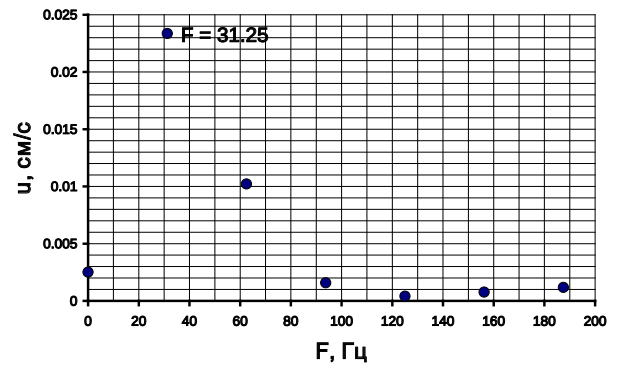
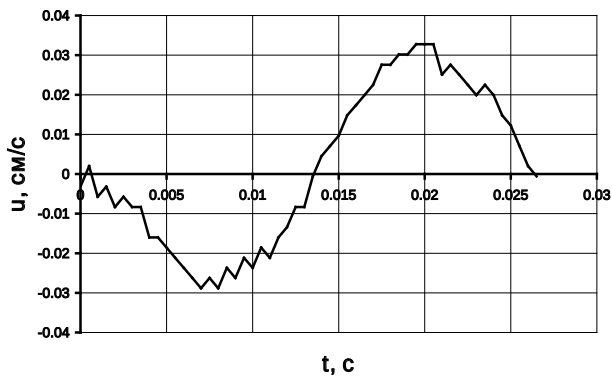


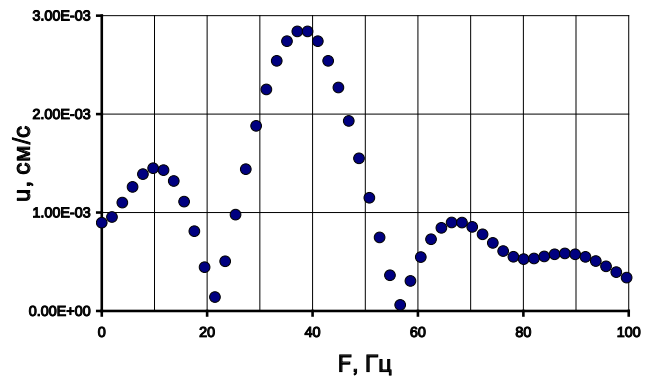
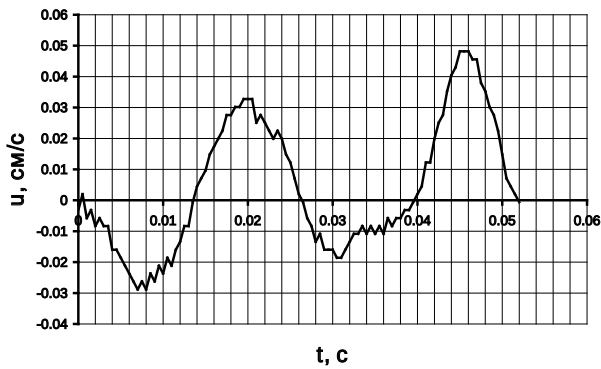
Рис. 3. Фрагмент осцилограми рис. 1 короткостовільного вибуху на Демне-Добрянському кар'єрі до часу 0,4 с



а

б

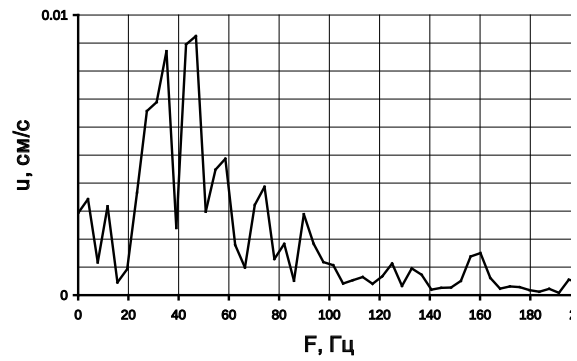
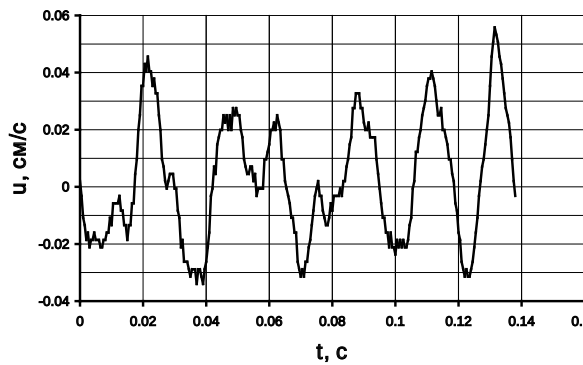
Рис. 4. Перший фрагмент запису: а – часова залежність, б – частотна



а

б

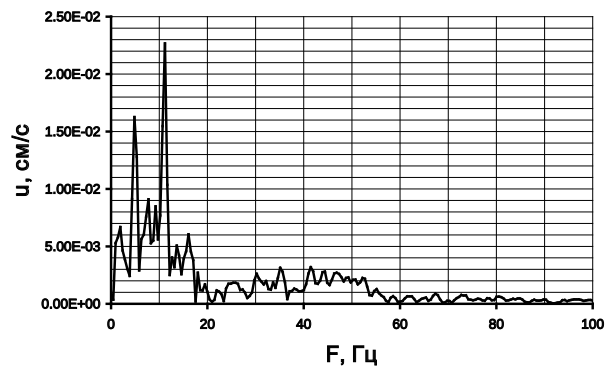
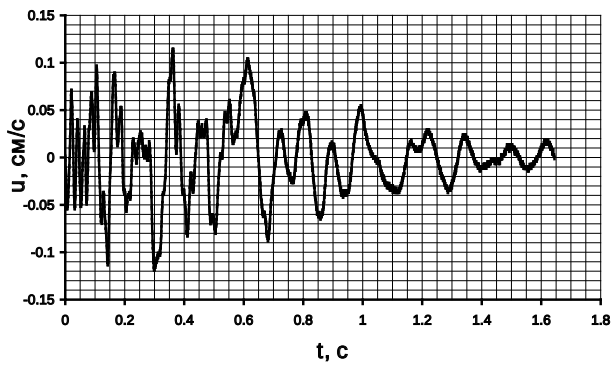
Рис. 5. Другий фрагмент запису: а – часова залежність, б – частотна



а

б

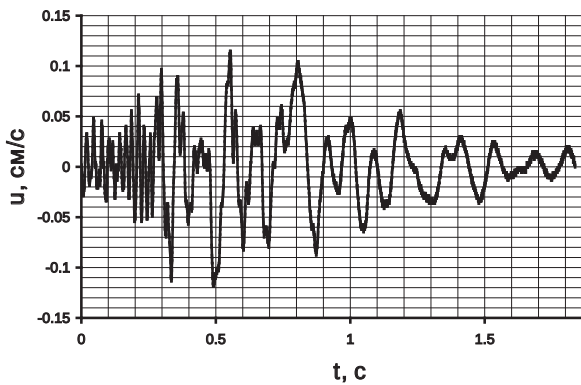
Рис. 6. Фрагмент № 3: а – часова залежність, б – частотна



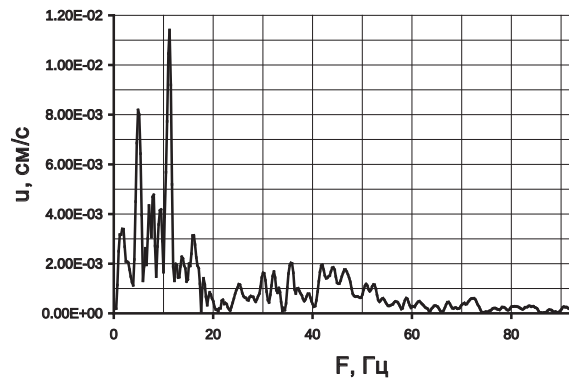
а

б

Рис. 7. Фрагмент №4: а – часова залежність, б – частотна



а



б

Рис. 8. Сигнал із сенсора № 166: а – часова залежність, б – частотна

приходу поперечної хвилі. Спектральний аналіз цього фрагмента показав доміную частоту 31,25 Гц, яка є характерною для поздовжньої хвилі в цих умовах. Ця частота слугує «паспортом» поздовжньої хвилі для подальшої ідентифікації.

Другий фрагмент (Рис. 5), що містить додатковий період коливань, дає змогу верифікувати правильність визначення часу вступу поперечної хвилі. Спектральний аналіз підтвердив присутність частот понад 20 Гц, характерних для об'ємних хвиль.

Третій фрагмент (Рис. 6) без першого періоду (без великого складника поздовжньої хвилі) також демонструє перевагу частот понад 20 Гц, що підтверджує присутність поперечних хвиль.

Четвертий фрагмент (Рис. 7). Спектральний аналіз пізніх фрагментів показав зміну частотного складу з перевагою частот до 20 Гц, що свідчить про домінування поверхневих хвиль.

Спектральний аналіз усього (повного) сигналу (Рис. 8) від датчика № 166 продемонстрував перевагу низьких частот (до 20 Гц) через значний вклад поверхневих хвиль у загальну картину сейсмічних коливань.

На основі проведених досліджень встановлено часові, частотні та амплітудні критерії ідентифікації сейсмічних коливань.

Часові критерії – враховують послідовність приходу хвиль, а саме: Р-хвиля → S-хвиля → R-хвиля. Причому різниця в часі приходу між типами хвиль відповідає розрахунком швидкостям

Частотні критерії – об'ємні хвилі (Р та S): домінуючі частоти > 20 Гц (25–35 Гц); поверхневі хвилі (R): домінуючі частоти < 20 Гц; можливість виділення часових границь зміни частотного спектра.

Амплітудні критерії – поверхневі хвилі характеризуються відносно більшими амплітудами; поздовжні хвилі мають характерні імпульсні форми на початку запису.

Запропонований метод ідентифікації сейсмічних хвиль на будівлі та споруди містить алгоритм, наведений на рис. 9.

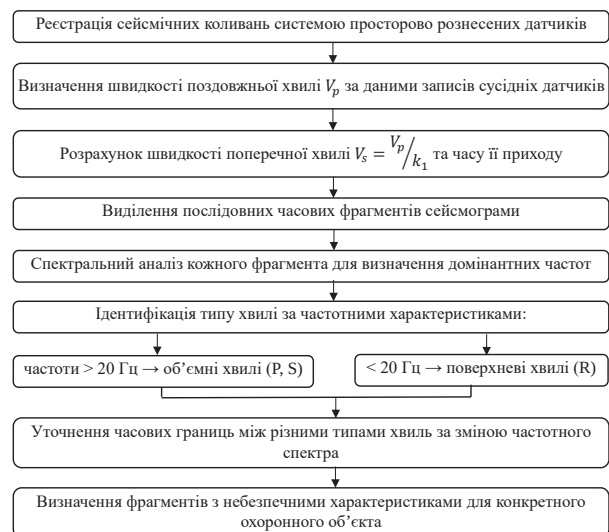


Рис. 9. Алгоритм ідентифікації сейсмічних коливань на будівлі та споруди

За проведеною ідентифікацією сейсмічних коливань можна оцінити ступінь небезпеки для будівель та споруд за такими факторами:

- можливість утворення резонансних явищ, якщо домінуючі частоти хвиль збігаються з власними частотами конструкцій;
- перевищення допустимих швидкостей за амплітудою коливань;
- за типом хвиль: об'ємні хвилі небезпечні при резонансних явищах, поверхневі хвилі – при значних амплітудах.

За допомогою запропонованої методики можна: виявляти фрагменти сейсмограм з частотами, близькими до власних частот охоронного об'єкта; оцінювати максимальні швидкості коливань для кожного типу хвиль окремо; прогнозувати найбільш небезпечні фази сейсмічного впливу; оптимізувати параметри короткоуповільненого підривання для зменшення негативного впливу.

Висновки

1. Розроблено метод ідентифікації сейсмоакустичних хвиль, що базується на поєднанні часових та частотних характеристик фрагментів сейсмограм.

2. Метод дає змогу виконувати точну ідентифікацію об'єктних (поздовжніх та поперечних) і поверхневих хвиль за їх частотними характеристиками.

3. Установлено чіткі частотні критерії розмежування: об'ємні хвилі характеризуються

частотами понад 20 Гц, поверхневі хвилі – частотами до 20 Гц.

4. Показано можливість послідовного спектрального аналізу різних часових фрагментів для уточнення часових границь між різними типами хвиль.

5. Метод дає змогу виявляти фрагменти сейсмограм з небезпечними часовими та частотними характеристиками для конкретних будівель і споруд.

6. Розроблена методика може бути використана для оптимізації параметрів короткоуповільненого підривання з метою зменшення сейсмічного впливу на об'єкти інфраструктури.

7. Подальший розвиток методу передбачає створення автоматизованої системи ідентифікації хвиль у режимі реального часу та формування рекомендацій щодо захисту будівель і споруд.

ЛІТЕРАТУРА:

- ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України. На заміну ДБН В.1.1-12:2006; чинний від 2014-10-01. Вид. офіц. 2014. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58628 (дата звернення: 17.11.2025).
- Бойко В. В. Проблеми сейсмічної безпеки вибухової справи у кар'єрах України. Київ : ТОВ «Вид-во Сталь», 2012. 234 с.
- Бойко В. В., Ган А. Л., Ган О. Спеціальні вибухові технології в геоінженерії : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 316 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49097> (дата звернення: 10.11.2025).
- Boiko V., Han A., Khlevnyuk T., Zagoruyko E., Han O., Zakusylo R. Impact of Seismic and Air-Blast Waves Caused by Civilian and Military Explosions on Critical Infrastructure Facilities. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2024. № 21(4). P. 410–428. <https://doi.org/10.22211/cejem/199328>
- Бойко В. В., Ган А. Л., Хлевнюк Т. В., Загоруйко Є. А., Ган О. В., Дубовик В. Г. Оцінка напружено-деформованого стану схилів зсувонебезпечних територій на яких розташовані об'єкти критичної інфраструктури. *Збірник наукових праць НГУ*. 2024. № 77. С. 7–17. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.007>
- Бойко В. В., Войтенко Ю. І., Ган А. Л., Хлевнюк Т. В., Загоруйко Є. А., Ган О. В. Оцінка сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням їх власної гармоніки у вибуховому спектрі цивільного і воєнного характерів. *Технічна інженерія*. 2024. 1(93). С. 308–315. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-308-315](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-308-315).

REFERENCES:

- State Building Codes of Ukraine. (2014). Budivnytstvo v seismichnykh raionakh Ukrainy [Construction in seismic areas of Ukraine] (DBN V.1.1-12:2014). (replaces DBN V.1.1-12:2006; effective from October 1, 2014). Official publication. Retrieved November 17, 2025. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58628 [in Ukrainian].
- Boiko, V. V. (2012). Problemy seismichnoi bezpeky vybukhovoi spravy u kar'ierakh Ukrainy [Problems of seismic safety of blasting operations in the Ukrainian open-pit mine] Kyiv: Steel Publishing House LLC, 234 p. [in Ukrainian].
- Boiko, V. V., Han, A. L., & Han, O. V. (2022). Spetsialni vybukhovі tekhnolohii v heoіnzhenerii: monohrafiia [Special Explosive Technologies in Geoengineering: Monograph]. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49097> [in Ukrainian].
- Boiko, V., Han, A., Khlevnyuk, T., Zagoruyko, E., Han, O., & Zakusylo, R. (2024). Impact of Seismic and Air-Blast Waves Caused by Civilian and Military Explosions on Critical Infrastructure Facilities. *Central European Journal of Energetic Materials*, 21(4), 410–428. <https://doi.org/10.22211/cejem/199328>
- Boiko, V., Han, A., Khlevnyuk, T., Zagoruyko, E., Han, O., & Dubovyk, V. (2024). Otsinka napruzhenodeformovanoho stanu skhyliv zsuvo nebezpechnykh terytorii na yakykh roztashovani obiekty krytychnoi infrastruktury [Assessment of the stress-strain state of slopes in landslide-prone areas where critical infrastructure facilities are located]. *Collection of research papers of the National Mining University*, 77, 7–17. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/77.007> [in Ukrainian].
- Boiko, V., Voitenko, Y., Han, A., Khlevniuk, T., Zahoruiko, Y., & Han, O. (2024). Otsinka seismostiikosti obiektiv krytychnoi infrastruktury z urakhuvanniam yikh vlasnoi harmoniky u vybukhovomu spektri tsyvilnoho i voiennoho kharakteriv [Assessment of earthquake resistance of critical infrastructure objects, taking into account their own harmonics in the explosive spectrum of civil and military characters]. *Technical Engineering*, 1(93), 308–315. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-308-315](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-308-315) [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 19.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026