

© В.В. Бойко<sup>1</sup>, А.Л. Ган<sup>2</sup>, Т.В. Хлевнюк<sup>1</sup>, Є.А. Загоруйко<sup>1</sup>, О.В. Ган<sup>2</sup>, В.Г. Дубовик<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СХИЛІВ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕРИТОРІЙ НА ЯКИХ РОЗТАШОВАНІ ОБ'ЄКТИ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

© V. Boiko<sup>1</sup>, A. Han<sup>2</sup>, T. Khlevnyk<sup>1</sup>, E. Zagoruyko<sup>1</sup>, O. Han<sup>2</sup>, V. Dubovyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Hydromechanics of NASU, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

## ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIN STATE OF SLOPES IN LANDSLIDE-PRONE AREAS WHERE CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES ARE LOCATED

**Мета.** Забезпечення цілісності зсувонебезпечних територій за рахунок розробленого методу оцінки напружено-деформованого стану схилів на основі реєстрації сейсмічних хвиль.

**Методика.** Для вирішення поставлених задач було проведено: розрахунок зсувних напружень і відносних деформацій зсувонебезпечної ґрунтової ділянки; реєстрацію сейсмоколивачів за допомогою сейсмографа MiniMateplus з визначенням амплітуд масових швидкостей коливань та частотних характеристик за складовими (тангенціальними, вертикальними, радіальними), визначення критичних точок за величиною зсувних напружень та відносних деформацій, які наближені чи більші за критичні.

**Результати.** Під час проведення досліджень за рахунок реєстрації частотних характеристик на визначених відстанях по всьому його профілю можна не тільки оцінити стан небезпечності ґрунтових укосів в кожному його пункті, але й створити умови, при яких забезпечиться необхідна стійкість від додаткових особливих навантажень.

**Наукова новизна.** У роботі запропоновано спосіб моніторингу зсувонебезпечних територій, що базується на аналізі сейсмічних даних. Вперше отримано залежність напружено-деформованого стану схилів зсувонебезпечних територій від дії амплітуд масової швидкості коливань на основі реєстрації сейсмічних хвиль, що штучно збуджені за допомогою методу багаторазового покрокового удару при вільному падінні вантажу (штучний струс) та враховують тільки ті напруження зсуву та відносних деформацій, які за величиною мають значення наближені чи більші за критичні в тому ж діапазоні частот. При цьому встановлено, що при певній частоті виникають резонансні явища, які можуть ініціювати зсувні процеси.

Набув подальшого розвитку метод оцінки стійкості схилів, який дозволяє враховувати не тільки поточний стан небезпечності ґрунтових укосів, а й створити умови для забезпечення стійкості від впливу додаткових динамічних навантажень.

**Практична значимість.** На основі експериментальних досліджень встановлено, що для забезпечення сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури необхідно враховувати не тільки масову швидкість коливань частинок ґрунтового масиву, але й частотні характеристики самого об'єкту.

**Ключові слова:** пружні хвилі, критична інфраструктура, вибух цивільного та воєнного характерів, максимальна швидкість коливань, частота коливань, резонансні явища, норми сейсмічної безпеки.

**Вступ.** Багато мегаполісів в Україні та за її межами мають складний рельєф місцевості. Засвоєння підземного і наземного простору вимагає спорудження об'єктів критичної інфраструктури на пагорбах, схилах, карстових ділянках тощо. Природні явища або наслідки вибухів цивільного та воєнного характерів можуть суттєво змінювати фізико-механічні характеристики гірських порід а також впливати на їхній стан. Оцінка напружено-деформованого стану таких ділянок має особливе значення для забезпечення стійкості та надійності таких об'єктів протягом всього нормативного терміну експлуатації.

Існує багато методів оцінки напруженого стану зсувонебезпечних ділянок гірських порід. Наприклад, на гірничих підприємствах, оцінка напруженого стану гірничих порід визначається за допомогою видобувних механізмів, яка включає реєстрацію сигналів акустичної емісії в період зупинки видобувних механізмів, тобто при відсутності перешкод, створених робочим обладнанням [1]. Але цей спосіб: по-перше – оцінює напружений стан гірничих порід за інтенсивністю акустичних сигналів за час післядії працюючого обладнання, що по амплітудо-частотному спектру і інтенсивності відрізняються від сейсмічних хвиль, які попереджують умови порушення рівноваги, тобто викидонебезпечності масиву; а по-друге – важко застосувати для міських умов.

Також відомий спосіб оцінки стану стійкості зсувних укосів, що включає збудження сейсмічних хвиль струсовим вибухом, реєстрацію коливань під час і після вибуху і оцінюванню викидонебезпечності масиву враховуючи тільки ті імпульси після вибуху, які за величиною амплітуди масової швидкості рівні або більші за одержані при струсовій реєстрації в тому ж діапазоні частот [2]. Але даний спосіб не дає повної картини по всьому профілю зсувонебезпечної ділянки.

Тому запровадження нового методу [3] з підвищеної надійності оцінки напружено-деформованого стану схилів зсувонебезпечних територій за рахунок визначення необхідних параметрів в пунктах, розташованих по всьому профілю схилу, є актуальною на сьогоднішній день.

Метою роботи є забезпечення цілісності зсувонебезпечних територій за рахунок розробленого методу оцінки напружено-деформованого стану схилів на основі реєстрації сейсмічних хвиль.

Для вирішення мети в роботі були поставлені наступні завдання:

1. Визначити зсувонебезпечні ділянки ґрунтових укосів за рахунок сейсмічних хвиль, що збуджуються багаторазовим (покроковим ударом) вільним падінням з висоти вантажу

2. На основі практичних вимірювань запропонувати метод оцінки напружено-деформованого стану зсувонебезпечних ділянок.

3. Оцінити стійкість ґрунтових укосів та сейсмостійкість об'єктів критичної інфраструктури на конкретному прикладі.

**Основна частина.** Складність освоєння схилів зсувонебезпечних територій, зумовлена не тільки необхідністю обґрунтування структурно-функціональних та просторових рішень, але й різними властивостями товщі геологічного середовища, що накладає додаткові фактори впливу та елементи ризиків [4, 5].

Проблеми сьогодення, створені військовою агресією вимагають нового наукового, технічного і нормативного підходу щодо обґрунтування принципово нових напрямків підвищення сейсмобезпеки вибухових робіт для захисту охоронних об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням як характеру розповсюдження різних типів сейсмічних хвиль так і взаємодію їх частотних складових з власними гармоніками конструкцій будівель та споруд [6–9].

Запропонований метод [3] оцінки напружено-деформованого стану схилів зсувонебезпечних територій стосується гірничої і будівельної справи і може бути використаним для оцінки зсувонебезпечних ділянок природних і штучних схилів, кар'єрних уступів, будівель та споруд розташованих на пагорбах, схилах, укосах тощо та оснований на реєстрації сейсмічних хвиль, які штучно збуджуються багаторазовим (покроковим ударом) вільним падінням з висоти вантажу (штучний струс). На різних відстанях від епіцентру струсу по профілю укосу встановлюються сейсмодатчики. За отриманими даними із протоколу одержують значення амплітуд масових швидкостей коливань за складовими, які в подальшому використовують для розрахунку зсувних напружень та відносних деформацій від сейсмічних хвиль. Потім, на основі аналізу отриманих розрахункових даних проводять оцінку небезпечного стану масиву зсувного укосу в кожному його пункті (точці). При цьому враховуються тільки ті напруження зсуву та відносних деформацій, які за величиною мають значення наближені чи більші за критичні в тому ж діапазоні частот.

Кількість ударів, пунктів реєстрації коливань та довжина ділянок визначаються в залежності від розміру профілю укосу з урахуванням того, що довжина кожної ділянки повинна бути не менше довжина хвилі ( $r_1, r_2 \dots r_i > \lambda$ , м), яка визначається через еквівалентний заряд. Маса тротилового еквівалентного заряду вибухової речовини (ВР) від дії вільного падіння вантажу масою  $M$  (кг) з висоти  $H$  (м) визначається за формулою:

$$Q_e = \frac{E_k}{E_q} = \frac{M \cdot g \cdot H}{E_q}, \text{ кг}, \quad (1)$$

де:  $E_k$  – кінетична енергія вантажу в момент вільного падіння, Дж;  $E_q$  – енергія одиниці маси заряду, Дж/кг (для тротилу  $E_k = 4,2 \cdot 10^6$  Дж/кг)

$$E_k = M \cdot g \cdot H, \text{ Дж/кг}, \quad (2)$$

де:  $M$  – маса вантажу, що вільно падає, кг;  $H$  – висота падіння переміщення центру ваги вантажу до моменту зустрічі з ґрунтом, м.

При цьому масову швидкість коливань в поверхневій хвилі (Релея  $R$ ) для зосередженого заряду визначають за формулою.

$$U_R = K \left( \frac{r}{Q_{ef}^{1/3}} \right)^{-n}, \text{ см/с}, \quad (3)$$

де:  $K$  – коефіцієнт пропорційності, ( $M^{n+1}/с \cdot \text{кг}^{n/3}$ ),  $K = 250$  та  $K = 90$  для зосередженого та горизонтального циліндричного зарядів відповідно;  $n$ -показник ступеня затухання хвиль,  $n = 1,5$  та  $n = 1,3$  для зосередженого та горизонтального циліндричного зарядів відповідно;  $r$  – відстань від місця удару до пункту реєстрації, м. Визначення довжини хвилі  $\lambda$  проводилась з урахуванням швидкості поширення поздовжньої  $V_p$  та поперечної  $V_s$  хвиль, та її періоду ( $T_R, T_P, T_S, с$ ) (частоти) визначають за формулам:

$$T_R = 0,065 \cdot Q_e^{1/6} \cdot r^{0,1}, \text{ с}, \quad \lambda = V_s \cdot T_R, \text{ м}, \quad (4)$$

Для розрахунку в кожному пункті зсувного напруження та відносної деформації від дії сейсмічних хвиль проводять за амплітудами масових швидкостей коливань, визначених із протоколів вимірів, за тангенціальними ( $Y$ ), вертикальними ( $Z$ ) і радіальними складовими хвиль,  $U_x, U_z, U_y$  см/с; та даним:  $\rho$  – щільність ґрунту в точці виміру,  $\text{кг}/\text{см}^3$ ;  $V_p$  – швидкість поширення поздовжньої хвилі (м/с) на кожній ділянці вимірів на відстанях ( $r_1, r_2 \dots r_i$ , м), зсувне напруження ( $\tau_{xy}$ ,  $\text{кг}/\text{см}^2$ ), відносні деформації ( $\varepsilon_{xy}$ ) за трьома складовими коливань визначають у профілі укусу в кожному її пункті за формулами:

$$\tau_x = \frac{U_x \rho V_p}{2g}, \quad \tau_z = \frac{U_z \rho V_p}{2g}, \quad \tau_y = \frac{U_y \rho V_p}{2g}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_x = \frac{U_x}{V_s}, \quad \varepsilon_z = \frac{U_z}{V_s}, \quad \varepsilon_y = \frac{U_y}{V_s}. \quad (6)$$

Підставляючи чисельні значення зазначених параметрів у формули (5–7), в кожному профілі одержимо зсувні напруження та відносні деформації на початку зсувного укусу та у кінці. Порівнюючи ці значення з граничними, визначають значення, наближені чи більші за критичні в тому ж діапазоні частот і проводять оцінку напружено-деформованого стану схилів та визначають його зсувонебезпечність.

При проведенні експериментальних досліджень були застосовані наступні сейсмовимірювальні комплекси:

– перший комплекс, який складається із стандартних однокомпонентних електромагнітних датчиків СМ-3 моделі СВ-20-П (рис. 1), які мали такі технічні характеристики: власну частоту – 20 Гц; ступінь затухання сигналу – 0,55; коефіцієнт перетворення – 18 В/(м/с); нелінійні спотворення – не більше 1%; маса – 0,22 кг. В електромагнітних індукційних сейсмоприймачах СВ-20-П індукційний механічний перетворювач вимірював вертикальну складову сейсмічних коливань. Сейсмоприймач СВ-20-П установлювався у вертикальному положенні на поверхні ґрунту за умови жорсткого контакту (заглиблені у ґрунт). З підходом сейсмічної хвилі до поверхні ґрунт починає переміщуватися у вертикальному

напрямку. 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  $\Phi$  та індукцією  $B$ , завдяки чому виникає електрорушійна сила  $E$ . Частота електрорушійної сили відповідає частоті коливання вертикальної складової сейсмічної хвилі, а амплітуда  $E$  пропорційна амплітуді коливань цієї хвилі.

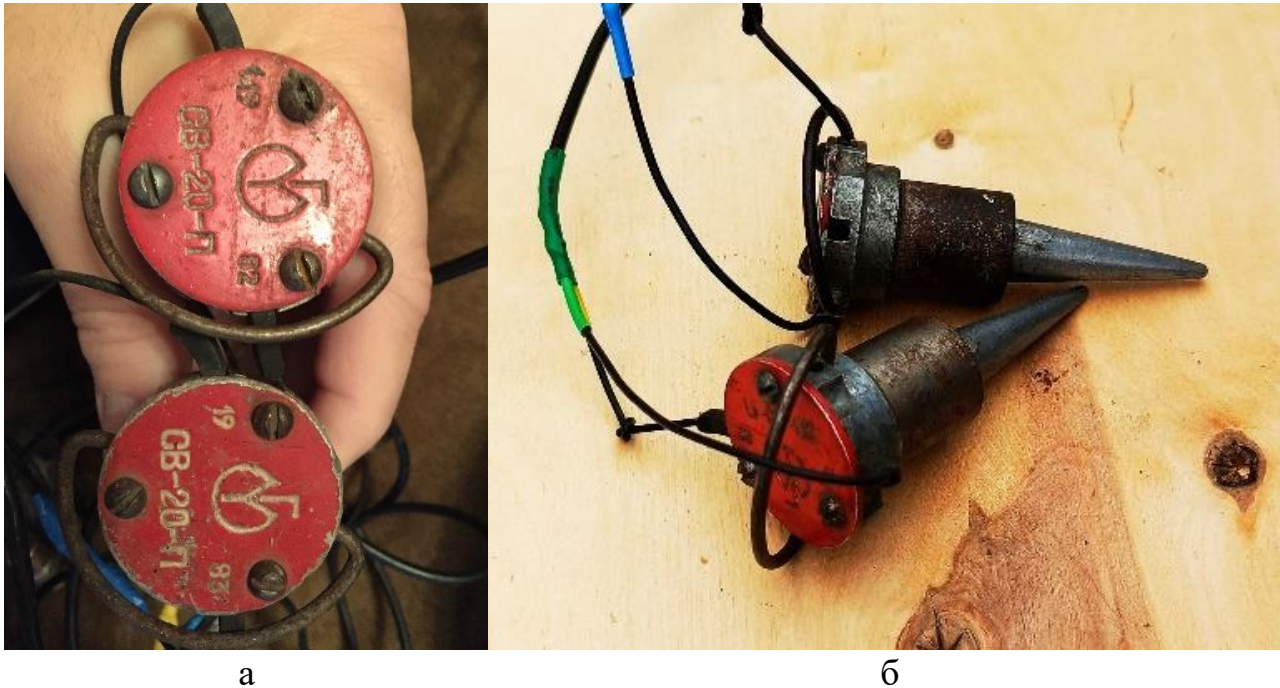


Рис. 1. Сейсмоприймачі: вид зверху (а) та вид збоку (б)

Електричні сигнали датчиків підсилювалися малошумними підсилювачами напруги, які вбудовані 4-канальний вимірювальний магнітофон типу 7005 фірми Bruel & Kjaer (Данія). Разом з цим вимірювальний магнітофон використовується, як засіб реєстрації результатів досліджень, які в подальшому будуть оброблятися та аналізуватися на комплексі апаратури фірми Bruel & Kjaer. Паралельно з магнітофоном електричні сигнали подаються на 16-канальний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) фірми L-Card і далі на персональний комп'ютер (ПК).

– другий комплекс – це сейсмограф MiniMatePlus (Канада), який складається із трикомпонентного датчика для реєстрації параметрів тангенціальних, вертикальних і радіальних (vert (Z), long (X) і tran (Y)) складових коливань (сейсмічних), та мікрофону для вимірювання ударно-повітряних хвиль (акустичних). Сейсмограф Mini Mate Plus сертифікований в Україні і належить фірмі Instante, яка є провідним виробником реєстраторів акустичних ударних хвиль і сейсмічних вібрацій. Ця високоточна апаратура по праву визнана самою надійною для моніторингу управління і реєстрації акустичних коливань в різних середовищах. Загальний вигляд сейсмографу MiniMate Plus приведений на рис. 2.



Рис. 2. Загальний вигляд сейсмографу MiniMate Plus

Основні характеристики сейсмографу MiniMate Plus наступні:

- можливість застосування режиму «Instantel Histogram Combo», який дозволяє реєструвати форму сигналу одночасно із записом гістограми;
- функція «Auto Call Home» дозволяє автоматизувати дистанційний моніторинг;
- частота вибірки знаходиться в межах від 1024 до 16384 знач./с на один канал; при роботі з одним каналом частота може досягати до 65536 знач./с;
- опція «Instantel 8-Channel» (8 каналів) дозволяє одночасно підключати два стандартних сейсмоприймача та два мікрофона до одного регістратору Minimate Plus;
- енергонезалежна пам'ять зі стандартним об'ємом, якої достатньо для реєстрації 300 подій (може бути розширена до 1500 подій);
- запис сигналів подій відбувається протягом 100 с при стандартній конфігурації та до 500 с – у вдосконаленому варіанті;
- можливість безперервного моніторингу, тобто нульовий час простою навіть, коли прилад виконує обробку даних;
- любий канал може працювати з широким діапазоном датчиків: сейсмоприймачів, акселерометрів або гідрофонів.

За допомогою програмного забезпечення THOR, одержані дані вимірювань із пам'яті сейсмографу MiniMateplus переносяться на персональний комп'ютер (ПК) та, після обробки, отримуємо результати у вигляді протоколів Event Report фірми Instantel в PDF – графічних та Excel – цифрових файлах.

Наведемо оцінку зсувонебезпечної ділянки ґрунтових укосів на прикладі діючого Карасанського зсуву №76, розташованого біля м. Алушта Кримська АР наступним чином.

Спочатку на плані Карасанського зсуву №76 розміщують профіль на якому планується проводити оцінку стану його стійкості. Кількість ділянок визначається таким чином, щоб довжина кожної ділянки була не менше довжини хвилі ( $\lambda$ , м), яку збуджує кожне разове вільне падіння з висоти  $h_{ван} = 1,5$  м вантаж 30 кг ( $\lambda < r_1, r_2 \dots r_i$ , м). Спочатку визначаємо масу тротилового еквівалентного заряду вибухової речовини (ВР) від дії вільного падіння вантажу 30 кг з висоти  $H = 1,5$  м:

$$Q_e = \frac{M \cdot g \cdot H}{E_q} = \frac{30 \cdot 9,81 \cdot 1,5}{4,2 \cdot 10^6} = 0,00011 \text{ кг.}$$

Масову швидкість коливань в поверхневій хвилі (Релея R) визначають для зосередженого заряду дія якого подібна удару (вільне падіння з висоти вантажу).

$$U_R = 250 \left( \frac{20}{0,00011^{1/3}} \right)^{-1,5} = 0,031 \text{ см/с.}$$

Визначення довжини хвилі  $\lambda$  проводилась з урахуванням швидкості розповсюдження поздовжньої  $V_P$  та поперечної  $V_S$  хвиль, та її періоду (частоти) за формулами:

$$T_R = 0,065 \cdot 0,031^{1/6} \cdot 20^{0,1} = 0,04 \text{ с } (f = 25 \text{ Гц}), \quad \lambda = 900 \cdot 0,04 = 36 \text{ м.}$$

Таким чином, довжина кожної ділянки приймається не менше 36 м. Враховуючи що довжина поздовжнього профілю в ґрунтовій основі масиву Карасанського зсуву № 76 становить 80 м, то сейсмічні хвилі збуджувались двократним вільним падінням з висоти  $h_{ван} = 1,5$  м вантажем 30 кг, а сейсмопримачі встановлювались при першому ударі на відстані  $r_1 = 40$  м (відм. +490 м) та другому –  $r_2 = 40$  м (відм. +512 м).

Реєстрацію сейсмоколивань проводили в два прийоми за допомогою сейсмографа MiniMateplus (див. рис. 2). За двома протоколами вимірів одержали спектрограми і сейсмограми а також значення амплітуд масової швидкості коливань та частотні характеристики за складовими, які використовувались для розрахунку зсувних напружень, відносних деформацій та стискаючих напружень від сейсмічних хвиль. Дані із протоколів і розрахунку зведені в табл.

Аналізуючи дані табл. бачимо, що розраховані зсувні напруження та відносні деформації на початку зсувного укосу на першій ділянці  $r_1$  за всіма складовими на порядок більше ніж на другій ділянці  $r_2$ . Порівнюючи значення граничного опору зрушенню ґрунтів та відносної деформації в зсувному укосі які дорівнюють  $0,93 \text{ кг/см}^2$  та  $0,5 \times 10^{-3}$  та викликані, від першого і другого ударів, сейсмічною хвилею зсувного напруження бачимо, що на другій ділянці є достатній запас міцності, щоб зсувний укіс зберігав свою стійкість навіть при динамічних впливах на нього. Стосовно першої ділянки є небезпека зсуву укосу, оскільки за

величиною відносної деформації  $\varepsilon_z = 80 \cdot 10^{-5}$  мають найбільші значення, що наближені до критичних на частоті  $f = 32$  Гц.

Таблиця

Частотні та деформаційні параметри досліджуваних ділянок

Показники	$r_1$ Перша ділянка	$r_2$ Друга ділянка	Граничні значення
Масові швидкості коливань ( <b>PPV</b> ), mm/s	$U_y = 2,46$ $U_z = 4,81$ $U_x = 3,16$	$U_y = 0,17$ $U_z = 0,35$ $U_x = 0,28$	
Зсувні напруження від сейсмічних хвиль, кг/см <sup>2</sup>	$\tau_y = 0,163$ $\tau_z = 0,319$ $\tau_x = 0,21$	$\tau_y = 0,011$ $\tau_z = 0,023$ $\tau_x = 0,019$	[0,93] кг/см <sup>2</sup>
Відносні деформації	$\varepsilon_y = 41 \cdot 10^{-5}$ $\varepsilon_z = 80 \cdot 10^{-5}$ $\varepsilon_x = 53 \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_y = 2,8 \cdot 10^{-5}$ $\varepsilon_z = 5,8 \cdot 10^{-5}$ $\varepsilon_x = 4,6 \cdot 10^{-5}$	[0,5 · 10 <sup>-3</sup> ]
Максимальна частота коливань ( <b>ZC Freq</b> ), Hz	$F_y = 40$ $F_z = 32$ $F_x = 27$	$F_y = 20$ $F_z = 15$ $F_x = 18$	

*tran (Y), vert (Z) u long (X) – тангенціальна, вертикальна і радіальна складові коливань.*

Далі використовуючи патент UA №156136 [3] проведемо оцінку зсувонебезпечності ґрунтового схилу, під час проведення масового вибуху (загальний час ініціювання зарядів – 580 мс, тобто при загальній масі ВР 9750,55 кг, середня, на весь вибух, маса заряду ВР, яка вибухає за одну мс, становила 16,81 кг) на північному борту кар'єру ВАТ "Шархінський кар'єр" з боку діючого Карасанського зсуву №76 за методом сейсмічних хвиль збуджених короткосповільненим вибухом свердловинних зарядів вибухової речовини з використанням сейсмовимірювальних комплексів наведених вище. При цьому вимірювальний профіль був визначений на відмітках: пункт 1 (+490) – пункт 2 (+512) м (відстані  $r_1=640$ м та  $r_2=680$  м), такий, як при штучному струсі і який був зорієнтований з боку фронту вибухового блоку, що підривався. При цьому сейсмовибухові хвилі (СВХ) розповсюджувались через вироблений простір кар'єру. Слід відмітити, що пункт 1 вибрано на ґрунтовій основі тіла Карасанського зсуву №76, на ділянці розташування об'єкту критичної інфраструктури (газопроводу "Алушта-Ялта"), а сейсмограф розташовувався безпосередньо біля газопроводу (відм. +512 м) – на відстані 680 м за горизонтом та 696 м за нахилом. Враховуючи різницю відміток місць між вибуховим блоком з відм.+362 м та пунктом установки сейсмоприймача відм. +512 м, перевищення становить – 150 м. Фрагмент протоколу сейсмограми коливань ґрунтової основи Карасанського зсуву №76 в пунктах № 1,2 при проведенні масового вибуху на північному борту кар'єра ВАТ "Шархінський кар'єр" наведено на рис. 3. а також значення максимальних амплітуд масової швидкості коливань та частотні характеристики поверхневої хвилі Релея (R), які



використовувались для розрахунку зсувних напружень, відносної деформації та стискаючих напружень від сейсмічних хвиль.

Аналізуючи сейсмограми коливань ґрунту рис. 3, збуджених масовим вибухом на північному борту кар'єру, коли СВХ розповсюджувались за двома ділянками ґрунтового тіла діючого зсуву, на якому були установлені пункти спостереження (сейсмоприймачі) та розташований об'єкт критичної інфраструктури (газопровід "Алушта-Ялта", який проходить в тілі Карасанського зсуву №76 північно-східної частини борту кар'єру), слід відмітити, що у цьому випадку зменшилися, як умови згасання для об'ємних хвиль (P, S), так і умови утворення поверхневої хвилі Релея (R). У результаті на вимірювальному профілі масова швидкість коливань в об'ємній хвилі в 1,5 рази, а частота коливань в 2 рази більші, ніж у поверхневій хвилі. Які коливання є більш небезпечними можна судити знаючи власний період коливань об'єкту, тобто якщо відома його амплітудно-частотна характеристика. Тому що один параметр – масова швидкість коливань, хоч і є важливим критерієм сейсмостійкості, але не являється визначальним без частотної характеристики самого об'єкту. Використовуючи дані про сейсмічну бальність району (Крим) за шкалою MSK-64, була оцінена сейсмічна небезпека (за амплітудою швидкості коливань), яка відповідає 9-ти балам. Остання визначалася по співвідношенню частоти коливань газопроводу і частоти коливань часток ґрунтового тіла діючого оповзня на ділянці, в якому проходить магістраль. Зокрема отримано наукове обґрунтування того фактору, коли після вибуху (зняття динамічного навантаження) тіло зсуву продовжувало вільно коливатися, створюючи умови, при яких виникають небезпечні резонансні явища і які можуть привести до "критичної точки" зсуву ґрунтової основи газопроводу, тобто до його аварії.

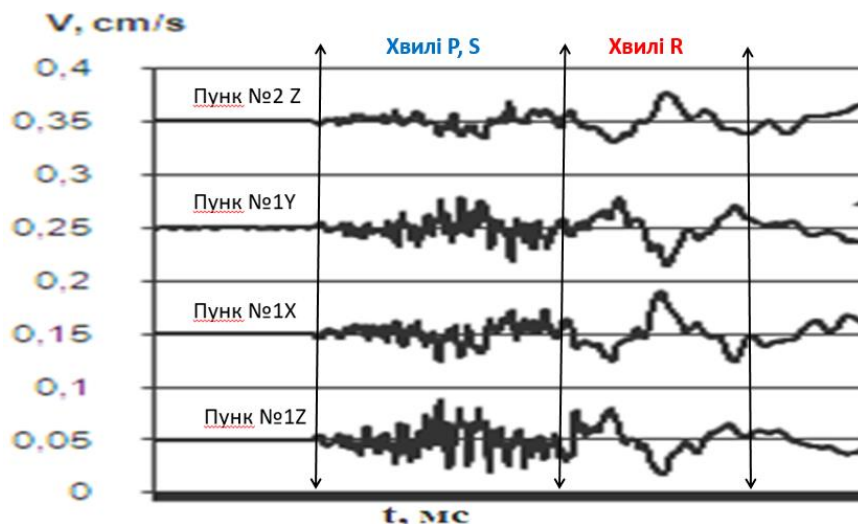


Рис. 3. Сейсмограми коливань ґрунту Карасанського зсуву №76 під час проведення масового вибуху на кар'єрі ВАТ "Шархінський кар'єр": пункти 1, 2 – максимальні амплітуди швидкості коливань 0,020; 0,016 см/с, (шкала MSK-64 – до 1 бала). Час дії коливань, виділеного з осцилограми вибухового процесу - 0,7; 0,7 с. Після закінчення вибуху продовжуються коливання масиву - 0,5; 0,7 с, з амплітудою в 1,3; 2 рази більшою, ніж при основному процесі.

Домінуючі частоти коливань 8,0; 5,0 Гц відповідно

Довідковим виданням "Стан техногенної та природної безпеки в Україні в 2001 році" прогнозується можлива інтенсивність струсів при землетрусах для Кримської АР на рівні 7 балів за шкалою MSK-64 (16–32 см/с).

Якщо порівняти вибух з сейсмічною шкалою бальності при землетрусах, то інтенсивність в 7 балів викликала б ушкодження всіх будинків (які збудовані без антисейсмічних засобів) і в тому числі подіяла б на стійкість зсувного укосу.

Але важко порівнювати інтенсивність струсів при ударах і землетрусах, тому що різко відрізняються частотні характеристики хвильових процесів, хоча можливо припустити, що розглянутий нами зсувний укіс при землетрусі в 7 балів одержить вплив, що у кілька разів перевищує розрахований згідно вище наведених параметрів ВР. Тому при землетрусі можливе з великою імовірністю збудження зсувних процесів.

**Висновки.** За допомогою запропонованої методики визначення оцінки напружено-деформованого стану схилів зсувонебезпечних територій за рахунок реєстрації частотних характеристик на визначених відстанях по всьому його профілю можна не тільки оцінити стан небезпечності ґрунтових укосів в кожному його пункті, але й створити умови, при яких забезпечиться необхідна стійкість від додаткових особливих навантажень.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що для забезпечення сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури необхідно враховувати не тільки масову швидкість коливань частинок ґрунтового масиву, але й частотні характеристики самого об'єкту.

Порівняння СВХ з сейсмічною шкалою бальності при землетрусах на вплив споруд критичної інфраструктури вимагає додаткового корегування.

#### Перелік посилань

1. *SU 1445307. кл. E21 C 39/00* (1986).
2. *Спосіб оцінки напруженого стану гірничих масивів* (Патент України № 79168). (2013). УкрНОІВІ.
3. *Спосіб оцінки напружено-деформованого стану схилів зсувонебезпечних територій* (Патент України № 156136). (2024). УкрНОІВІ.
4. Бойко, В. В., Ган, А. Л., & Ган, О. В. (2022). *Спеціальні вибухові технології в геоінженерії*. КПІ ім. Ігоря Сікорського. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49097>
5. Бойко, В. В., Кравець, В. Г., & Коробійчук, В. В. (2015). *Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху*. ЖДТУ.
6. Бойко, В. В. (2021). *Проблеми сейсмічної безпеки вибухової справи у кар'єрах України*. ТОВ "Видавництво Сталь".
7. Boiko, V., Kravets, V., Han, O., Han, A., & Zakusylo, R. (2023). Efficiency of Using Explosive Foam Compositions for Compacting Structurally Unstable Soil. *Central European Journal of Energetic Materials*, 20(4), 442–454. <https://doi.org/10.22211/cejem/176913>
8. *Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки, ДСТУ № 4704:2008* (2009). Україна.
9. *Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмостійкості будівель і споруд, ДСТУ № 7116:2009* (2010). Україна.

**ABSTRACT**

**Purpose.** Ensure the integrity of landslide-prone areas through a developed method for assessing the stress-strain state of slopes based on seismic wave registration.

**The methods.** To solve these tasks, the following steps were conducted: calculation of shear stresses and relative deformations of the landslide-prone soil area; registration of seismic vibrations using a MiniMateplus seismograph, determining the amplitudes of mass vibration velocities and frequency characteristics by components (tangential, vertical, radial), and identification of critical points based on shear stress magnitudes and relative deformations that are close to or exceed critical values.

**Findings.** Through the registration of frequency characteristics at specified distances along the entire profile, it is possible not only to assess the hazard level of soil slopes at each point but also to create conditions ensuring necessary stability against additional special loads.

**The originality.** The study introduces a method for monitoring landslide-prone areas based on seismic data analysis. For the first time, the dependency of stress-strain states of slopes in landslide-prone areas on the impact of amplitude frequencies of multiple stepwise free-fall drops of a load (artificial shock) is established through the registration of artificially induced seismic waves. The method considers only those shear stresses and relative deformations whose magnitudes are close to or exceed critical values within the same frequency range. It has been determined that resonance phenomena occur at specific frequencies, which can initiate landslide processes. The slope stability assessment method has further evolved to account not only for the current state of soil slope hazards but also to ensure stability against additional dynamic loads.

**Practical implementation.** Experimental studies have established that to ensure the seismic resistance of critical infrastructure objects, it is necessary to consider not only the mass vibration velocity of soil particles but also the frequency characteristics of the object itself.

**Keywords:** *elastic waves, critical infrastructure, civilian and military explosions, maximum vibration velocity, vibration frequency, resonance phenomena, seismic safety standards.*