

## Тиксотропні властивості наливних ґрунтів хвостосховищ – геофізичні критерії прогнозу

Ірина ВІКТОСЕНКО<sup>1</sup>, Михайло ДОВБНІЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Карлів Університет (Albertov 6, Praha 2, Чеська республіка, 128 00)

<sup>2</sup> НТУ «Дніпровська політехніка» (пр. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49 005)

<sup>1</sup> irzna.viktosenko@natur.cuni.cz, orcid.org/0009-0001-1590-2723

<sup>2</sup> dovbnichm@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9167-4630

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.45-54

**Анотація.** Хвостосховища крупних гірничо-збагачувальних комбінатів відносяться до особливо відповідальних споруд (клас наслідків СС3), руйнування яких може спричинити важкі екологічні та соціально-економічні наслідки. Одним з факторів, що впливають на безпеку функціонування подібних об'єктів, є сильні сейсмічні впливи, викликані землетрусами тектонічної та техногенно-індукованої природи. Хвостосховища є техногенними об'єктами, що істотно змінюють інженерно-геологічну та ландшафтну обстановку територій. Антропогенні зміни геологічного середовища, що пов'язані з будівництвом і експлуатацією хвостосховищ значно впливають і на локальні зміни сейсмічності.

При нарощуванні об'ємів хвостосховищ в основі огороджуючих дамб наступних ярусів розташовані низькошвидкісні, обводнені техногенні ґрунти. При проектуванні цих споруд необхідно враховувати можливість розрідження ґрунтів у їх основі.

В роботі обговорюються результати апробації підходів оцінки сейсмічного розрідження техногенних ґрунтів за геофізичними даними в умовах хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів Криворізького залізничного басейну.

Показано, що основними геофізичними факторами, які визначають можливість розрідження, є значення прогнозних пікових горизонтальних прискорень поверхні ґрунту та закон зміни швидкості поперечних хвиль з глибиною. Істотний вклад робить і глибина досліджуваної точки в розрізі. Для точок, розташованих нижче рівня ґрунтових вод (РГВ), варіації положення РГВ і щільності ґрунту вище і нижче РГВ (для фізично реальних ситуацій) впливають на



**Ірина ВІКТОСЕНКО**

докторант кафедри гідрогеології, інженерної геології та прикладної геофізики Карлового університету



**Михайло ДОВБНІЧ**

професор, завідувач кафедри геофізичних методів розвідки, доктор геол. наук

потенціал розрідження істотно менше, ніж перераховані вище фактори.

Обґрунтовано перспективи геофізичної оцінки динамічної стійкості ґрунтів техногенних об'єктів. Вперше цей підхід було випробувано на території хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів України. Розглянуто отримані авторами результати оцінки можливості сейсмічного розрідження низькошвидкісних техногенних ґрунтів на підставі свердловинної та польової сейсморозвідки на одному з хвостосховищ Кривого Рогу. Підхід, який використовується, є перспективною альтернативою або доповненням до підходів, що базуються на penetраційних властивостях, та істотно підвищить достовірність прогнозу можливості розрідження техногенних ґрунтів у разі динамічного впливу різної природи.

**Ключові слова.** Хвостосховища, наливні ґрунти, сейсмічне розрідження, прогноз, геофізичні критерії.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сейсмічний вплив на хвостосховища Криворізького залізорудного басейну мають сильні землетруси Карпатського и Кримського сейсмоактивних регіонів, району Добруджі, а також відносно слабкі місцеві землетруси, що відбуваються в межах Українського кристалічного щита у тому числі в зоні Криворізько-Кременчуцького розлому (Pihulevskiy et al., 2023, Pihulevskiy et al., 2021).

Наслідки сильних землетрусів у різних регіонах нашої планети переконливо свідчать про те, що залишкові зміщення ґрунту відіграють найчастіше першорядну роль у порушенні цілісності будівель та споруд. Одним з найпоширеніших явищ є сейсмічне розрідження ґрунтів при землетрусах (Voznesensky, 1998).

Найчастіше розріджуються водонасичені дрібні та пилюваті піски. Чим більша пористість ґрунту, тим при менших динамічних впливах починається розрідження. Явище розрідження полягає в повній або частковій втраті ґрунтом несучої здатності та переході його в текучий стан у результаті руйнування структури та зміщення частинок відносно одна одної. Необхідними умовами розрідження є: руйнування структури (часто при динамічному впливі), можливість зміцнення ґрунту та повне насичення його водою. При руйнуванні структури та відтисканні порової води контакти між зернами губляться, і ґрунт повністю або частково втрачає несучу здатність протягом деякого часу. При цьому може статися руйнування споруди, через те, що дрібнозернисті піски, на відміну від інших великоуламкових ґрунтів, можуть перебувати в розрідженому стані протягом декількох годин. Чим пухкіший ґрунт і слабші структурні зв'язки, тим більше наступне за динамічним впливом ущільнення та осадка. Особливу небезпеку становлять ділянки з потужними шарами надзвичайно пухких пісків.

Розрідження ґрунтів може відбуватися під час землетрусів із різними за величиною магнітудами. Найбільш небезпечними є ґрунти, що залягають у перших метрах під

рівнем ґрунтових вод (Voznesensky, 1998). При проходженні пружної хвилі збуджуються коливання частинок ґрунту з різними швидкостями і частина контактів розривається. В результаті міцність ґрунту помітно (іноді в кілька разів) знижується. Водонасичені ґрунти (особливо дрібні пухкі піски) можуть розріджуватися при досить сильному сейсмічному впливі: при зникненні безпосереднього контакту між піщаними зернами. В якийсь момент вони виявляються начебто зваженими у воді, що вміщає їх. Вода при цьому прагне віджатися, але цей процес вимагає деякого часу, оскільки обмежується водопроникністю ґрунту.

Недоврахування фактору сейсмічного розрідження може призвести до того, що результат сейсмічного розрідження ґрунтів зазвичай супроводжується важкими аваріями навіть сейсмостійких споруд: споруди встигають "потонути", перекосяться або навіть "розірватися" на поверхні розріджених відкладень.

До ґрунтів, що легко розріджуються, зазвичай відносяться: всі слабо зв'язні ґрунти зазначеного вікового діапазону у водонасиченому стані (пилюваті піски, супіски та легкі суглинки, зокрема зволожені лесові ґрунти, золи тощо); піски дрібні та середньої крупності; зв'язані ґрунти, що мають метастабільні структури та низьку фізико-хімічну активність твердої компоненти (типу льодовиково-морських «пливунних» глин).

Оцінка можливості розрідження водонасичених дисперсних ґрунтів при очікуваних землетрусах є важливим завданням у комплексі вишукувань для проектування та будівництва споруд у сейсмічних районах. Аналізу механізму сейсмічного розрідження ґрунтів, основних факторів, що впливають на їх розріджуваність, методів експериментальної та експертної оцінки можливості розрідження та його наслідків присвячено велику кількість спеціальних наукових публікацій.

Все сказане повною мірою стосується й техногенних намівних ґрунтів у хвостосховищах гірничо-збагачувальних комбінатів. У процесі експлуатації гірничодобувних підприємств утворюється велика кількість

відходів, що є хаотичним перешаровуванням піщаних, супіщаних і суглинистих техногенних утворень.

При плануванні розміщення, проектуванні та експлуатації таких об'єктів, як породні відвали, хвостосховища, дамби та накопичувачі відходів, слід належним чином забезпечувати оцінку інженерно-геологічного ризику та впливу на навколишнє середовище, а також керування ними на всіх етапах проектного циклу.

Нарощування об'ємів хвостосховищ, у ряді випадків, призводить до будівництва огорожуваних дамб наступних рівнів в основі яких залягають обводнені техногенні ґрунти показано Рис. 1.

За наявності потенційних ризиків розрідження, пов'язаних із сейсмічною активністю, слід врахувати максимальну магнітуду землетрусу. Враховуючи, що огорожувальні дамби хвостосховищ відносяться до класу гідротехнічних споруд (ГТС), то відповідно ДБН В.1.1-12:2014 (Nemchunov et al., 2017) сейсмічну інтенсивність та пікові прискорення необхідно приймати рівними для двох рівнів: проектний землетрус (ПЗ); максимальний розрахунковий землетрус (МРЗ).

ПЗ має сприйматися гідротехнічною спорудою без порушення режиму нормальної експлуатації. При цьому допускаються залишкові усунення, тріщини та інші пошкодження, що не перешкоджають можливості ремонту споруди в умовах її нормального функціонування. МРЗ має сприйматися без загрози руйнування споруди чи прориву напірного фронту. При цьому допускаються пошкодження ГТС та її основи.

## МЕТА РОБОТИ

Апробація методу прогнозу сейсмічного розрідження техногенних ґрунтів хвостосховищ Криворізького залізничного басейну за даними сейсмозвідки і результатами оцінки сейсмічної небезпеки.

## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для вирішення питання щодо можливості сейсмічного розрідження ґрунтів при заданих характеристиках очікуваних землетрусів сьогодні можуть використовуватись (Voznesensky, 1998):

- польові методи оцінки динамічних властивостей ґрунтів;
- лабораторні методи динамічних випробувань ґрунтів.

Лабораторні динамічні випробування зразків дають однозначну відповідь на питання про можливість розрідження ґрунту (за умови адекватного моделювання вихідних умов), при цьому польові методи забезпечують оцінку можливості їх розрідження з певною часткою ймовірності. Причина цього полягає в тому, що польові методи, які використовуються сьогодні, базуються на емпіричних кореляційних залежностях між безпосередньо вимірюваними характеристиками ґрунтів у масиві та їх опором розрідженню без моделювання очікуваних сейсмічних впливів у масиві, тобто без проведення власне експерименту з динамічного навантаження ґрунту.

Лабораторні методи динамічних випробувань фізичних моделей геологічних тіл, земляних споруд, ґрунтових основ: випробування на вібростолах, відцентрове моделювання на геотехнічних центрифугах.

Широкий спектр польових методів динамічних випробувань ґрунтів можна розділити на три основні групи: сейсмоакустичні (геофізичні), вібраційні та геотехнічні, які принципово відрізняються як набором оцінюваних показників, так і способом їх отримання (Voznesensky, 1998).

Найбільш обґрунтованим серед усіх польових методів оцінки сейсмічної розрідження піщаних ґрунтів у природному заляганні, але таким, що не знайшов у наш час широкого застосування в Україні, є стандартна пенетрація (Seed et al., 2003). Метод полягає у визначенні кількості ударів N при зануренні стандартного ґрунтоноса на глибину 30 см. Стандартний ґрунтонос у США має довжину 32 дюйми

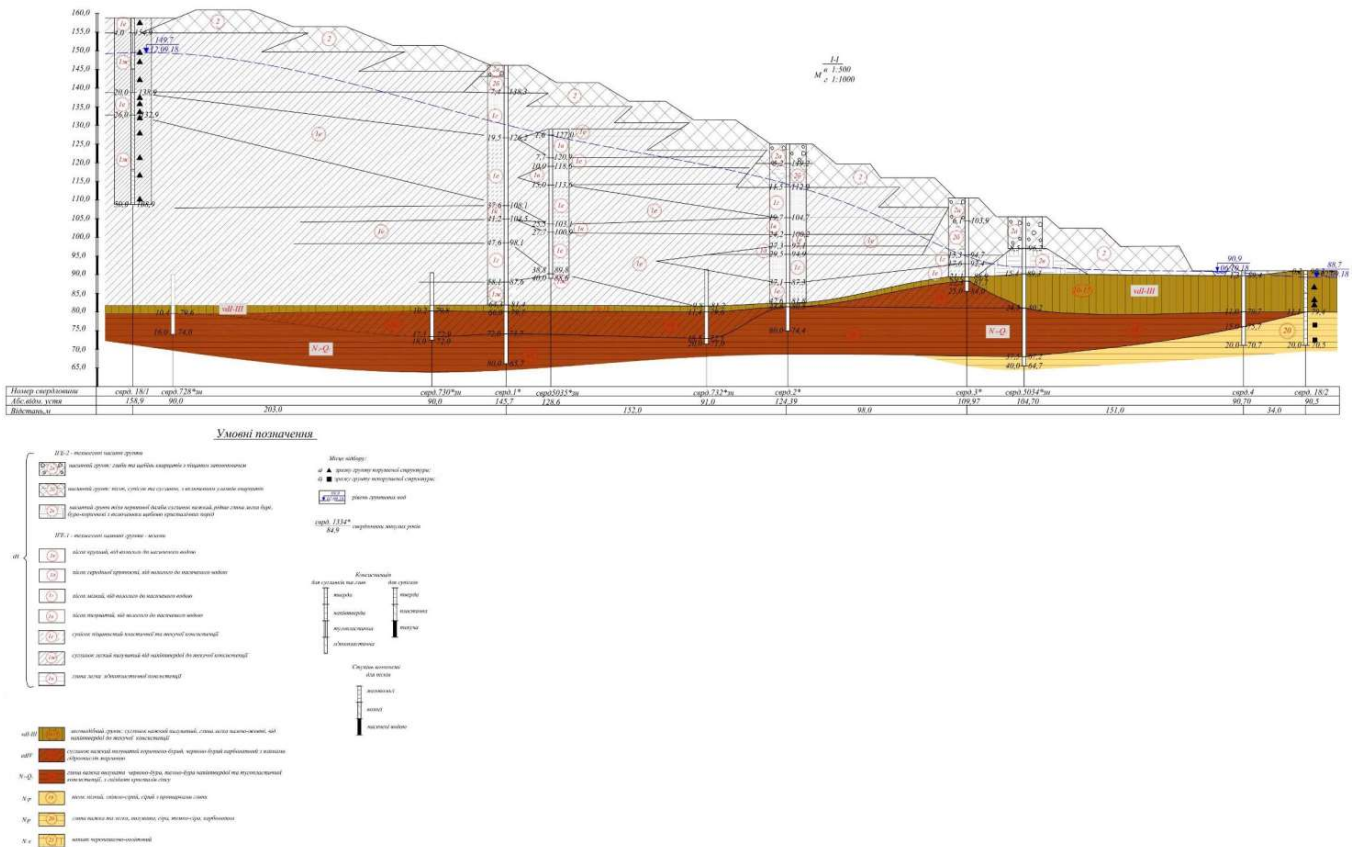


Рис.1. Приклад інженерно-геологічного розрізу огорожувальних дамб хвостосховища (за даними ДІ «УКРНДІВОДОКАНАЛПРОЕКТ»)  
 Fig. 1. Example of an engineering and geological section of tailings dams (based on data from the State Enterprise 'UKRNDIVODOKANALPROEKT')

(81,3 см), зовнішній діаметр 2 дюйми (5,18 см) і насухо занурюється ударами молота масою 140 фунтів (63,5 кг), що скидається з висоти 30 дюймів (76,2 см).

Отримані значення N нормалізуються за енергією впливу (за стандартний приймається 60%-й рівень потенційної енергії вільно падаючого молота) і за ефективним значенням природного тиску (за стандартне прийнято 100 кПа), що дозволяє порівнювати дані для різних точок випробування  $N_{1,60}$ .

Методика польового визначення потенціалу розрідження ґрунтів при сейсмічній дії передбачає, по-перше, визначення коефіцієнта циклічного напруження (CSR – cyclic stress ratio) у розрізі при прогнозованому землетрусі, який представляє циклічне навантаження на ґрунт. Величина коефіцієнта циклічного напруження (CSR) визначається

для конкретного місця з урахуванням ймовірності виникнення сейсмічного поштовху заданої сили (Ronald et al., 2000).

В основу оцінки можливості розрідження покладено емпіричні залежності між числом ударів  $N_{1,60}$  і критичним значенням наведеного циклічного напруження зсуву ( $CSR_{крит}$ ), що викликає розрідження ґрунтів при землетрусі з магнітудою  $M=7.5$  (обрано магнітуду представницького і досить інтенсивного поштовху). Значення  $CSR_{крит}$  визначається відповідно до кривих, що рекомендовано, та побудовано за результатами стандартних пенетраційних випробувань в місцях, що раніше піддавалися сейсмічним поштовхам, де при поштовхах різної інтенсивності відбувалося або не відбувалося розрідження ґрунтів. Криві  $CSR-N_{1,60}$  розмежують умови можливого розрідження (ліворуч від зазначених кривих) та

нерозрідження (праворуч від зазначених кривих) ґрунту.

На даний час розроблена перспективна альтернатива або доповнення до підходів, що базуються на пенетраційних властивостях – методика уточнення можливості сейсмічного розрідження ґрунтів на виділених ділянках та їх локалізація на підставі швидкостей поперечних хвиль ( $V_s$ ) за даними польової та/або свердловинної сейсморозвідки. Критерії розріджуваності ґрунтів за польовими вимірами швидкостей поперечних хвиль були запропоновані в роботі (Andrus et al., 1997) оскільки і  $V_s$ , і опір розрідження аналогічно залежить від багатьох однакових факторів (наприклад, коефіцієнт пористості, напружений стан і геологічний вік).

Одним з важливих факторів, що впливає на  $V_s$ , є напружений стан ґрунту. Лабораторні дослідження показали, що швидкість поширення поперечної хвилі однаково залежить від основних напружень у напрямі поширення хвилі та напрямку руху частинок.

Саме тому у розрахунках з оцінки сейсмічного розрідження виконують приведення швидкості поперечних хвиль  $V_s$  до еталонного тиску (Ronald et al., 1999):

$$V_{s1} = V_s \left( \frac{Pa}{\sigma'_v} \right)^{0.25} \quad (1)$$

де  $Pa$  – еталонний тиск, що приймається 100 кПа,  $\sigma'_v$  – ефективний природний тиск ґрунту.

Можливість використання інформації про швидкість поперечних хвиль  $V_s$  для оцінки ймовірного розрідження ґрунтів обґрунтована тим, що від таких факторів як коефіцієнт пористості, напружений стан, геологічний вік та ін. однаково також залежить і кількість ударів  $N_{1,60}$  методу стандартної пенетрації. Прикладом можуть бути досить тісні залежності між  $V_{s1}$  і  $N_{1,60}$ , отримані на підставі великої кількості експериментальних даних (Ronald et al., 1999).

Використання величини  $V_s$  як критерію розріджуваності ґрунтів має певні переваги (Youd et al., 2001):

1) вимірювання  $V_s$  можна проводити в ґрунтах, які складно досліджувати зондуванням або відбирати зразки (наприклад, гравійно-галькові відкладення), а також у місцях, де не можна проводити розвідувальні роботи;

2)  $V_s$  – це найважливіший показник фізико-механічних властивостей ґрунту, прямо пов'язаний з його модулем зсуву при малих деформаціях, який потрібний для аналітичної оцінки реакції ґрунтів на динамічні впливи та взаємодії ґрунтів із спорудою в умовах таких впливів.

Як і в методі стандартної пенетрації, другою найважливішою характеристикою, що визначає можливість виникнення явища розрідження, є коефіцієнт циклічного напруження (CSR). У 1971 р. Seed та Idriss запропонували метод оцінки CSR на підставі пікового горизонтального прискорення на поверхні масиву ґрунтів, що дозволяє його використовувати в методі, заснованому на вимірюваннях  $V_s$ .

Згідно з цим підходом коефіцієнт циклічного напруження CSR може бути визначений з рівняння (Seed et al., 2003):

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot r_d \quad (2)$$

де:  $\tau_{av}$  – середнє значення очікуваних циклічних напружень зсуву при піковому горизонтальному прискоренні на поверхні ґрунту  $a_{max}$ ;

$\sigma_v$  – повний природний тиск ґрунту;

$\sigma'_v$  – ефективний природний тиск ґрунту;

$r_d$  – коефіцієнт зниження напруження з глибиною.

Пікові прискорення  $a_{max}$  приймаються різними прогнозним значенням максимальних прискорень для проектного та максимального розрахункового землетрусу. Ці характеристики отримують під час оцінки сейсмічності майданчика розміщення об'єкта з урахуванням сейсмічного мікрорайонування.

Повний природний тиск ґрунту  $\sigma_v$  оцінюється як літостатичний тиск, розрахований на досліджуваній глибині для реальної

щільності ґрунтів вище та нижче за рівень ґрунтових вод.

Ефективний природний тиск ґрунту  $\sigma'_v$  обчислюється як різниця між повним природним тиском ґрунту  $\sigma_v$  та тиском рідини в ґрунті (гідростатичний тиск), який також може бути відносно просто оцінений при відомому рівні ґрунтових вод та глибині точки досліджень.

Значення коефіцієнта  $r_d$  оцінюється з графіка, побудованого Seed і Idriss (Seed et al., 2003). Цей графік було визначено на підставі інформації про безліч різних землетрусів та станів ґрунту.

Рекомендовані аналітичні залежності коефіцієнта зниження напруги  $r_d$  з глибиною можна подати у вигляді рівнянь (Seed et al., 2003):

$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765z, & z \leq 9.15 \text{ m} \\ r_d &= 1.174 - 0.0267z, & 9.15 < z \leq 23 \text{ m} \\ r_d &= 0.744 - 0.008z, & 23 \text{ m} < z \leq 30 \text{ m}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $z$  – глибина від денної поверхні до точки виміру, м.

Виконані різними авторами дослідження зв'язку між коефіцієнтом циклічного напруження (CSR), наведеними швидкостями поперечних хвиль до еталонного тиску ( $V_{s1}$ ) і явищами розрідження ґрунту для землетрусів, що реально відбулися, дозволили отримати криві, що розмежовують поле CSR- $V_{s1}$  на дві області для яких розрідження можливе і неможливе.

В роботі (Youd et al., 2003) наведено криві CSR- $V_{s1}$ , що рекомендовано для оцінки можливості розрідження ґрунту, які було запропоновано в 1997 на семінарі NCEER.

Для кількісної оцінки сейсмічного розрідження ґрунтів у сучасній світовій практиці використовується величина потенціалу розрідження ( $F_s$ ), що має фізичний зміст коефіцієнта запасу:

$$FS = \frac{CRR}{CSR}, \quad (4)$$

де CSR (cyclic stress ratio) – коефіцієнт циклічного напруження; CRR (cyclic resistance ratio) – коефіцієнт циклічного опору.

Параметр CRR може бути визначений виходячи з наведеної швидкості поперечних хвиль до еталонного тиску ( $V_{s1}$ ).

Використання швидкості поперечних хвиль  $V_s$  як польового індексу розріджуваності засноване на тому, що як  $V_s$ , так і CRR значною мірою визначаються величиною ефективних стискаючих напружень, пористістю ґрунтів, історією їх навантаження та геологічним віком відкладень. Використання величини  $V_s$  як критерію розріджуваності ґрунтів має певні переваги та недоліки (Youd et al., 2001). В результаті численних досліджень було запропоновано наступну залежність між CRR и  $V_{s1}$  (Youd et al., 2001):

$$CRR = a \left( \frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + b \left( \frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right) \quad (5)$$

де  $V_{s1}^*$  – критичне для прояву розрідження значення коригованої швидкості поперечних хвиль  $V_{s1}$ ; а та  $b$  – параметри кривої (Andrus et al., 2000), для побудови рекомендованих кривих прийнято 0.022 і 2.8, відповідно.

Критичні швидкості  $V_{s1}^*$  залежать від вмісту пилювато-глинистих частинок у ґрунті і приймаються рівними (Ronald et al., 1999):

- $V_{s1}^*=200$  м/с при вмісті пилювато-глинистих частинок  $FC \geq 35\%$ ;
- $V_{s1}^*=215-0.5*(FC-5)$  м/с при вмісті пилювато-глинистих частинок  $5\% < FC < 35\%$ ;
- $V_{s1}^*=215$  м/с при вмісті пилювато-глинистих частинок  $FC < 5\%$ .

Розрідження, за прогнозами, відбувається, коли  $F_s \leq 1$ , і розрідження не відбуваються, коли при  $F_s > 1$ .

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

На підставі вищевикладеного підходу авторами статті проведено дослідження на низці хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів Кривого Рогу: ІНГЗК, ЦГЗК, ПівНГЗК.

Як приклад розглянемо отримані авторами результати оцінки можливості сейсмічного розрідження низькошвидкісних техногенних ґрунтів на підставі свердловинної та польової сейсморозвідки на одному з хвостосховищ Кривого Рогу (Dovbnich et al., 2015).

Вихідними даними для розрахунків були:

- максимальні горизонтальні прискорення  $a_{\max}$  для прогнозного та максимального розрахункового землетрусу;
- дані про зміну швидкості поширення поперечних хвиль  $V_s$  з глибиною;
- положення рівня ґрунтових вод (РГВ);
- значення щільності порід вище і нижче РГВ.

Особливості сейсмічності та сейсмотектонічних умов території України враховані спеціалістами Інституту геофізики НАН України при складанні карт загального сейсмічного районування України – ЗСР-2004, які є нормативними під час проектування споруд. Відповідно до вимог ДБН В.1.1-12:2014 розрахунок сейсмічної стійкості гідротехнічних споруд виконується для двох рівнів: проектний землетрус (ПЗ) – період повторюваності  $T \sim 500$  років та ймовірність перевищення протягом 50 років  $P=10\%$ ; максимальний розрахунковий землетрус (МРЗ) – період повторюваності  $T=5000$  років і можливість перевищення протягом 50 років  $P=1\%$ .

З урахуванням наявності низькошвидкісних намивних ґрунтів у часі хвостосховищ і техногенного рельєфу, нормативні значення сейсмічності, згідно з результатами сейсмічного мікрорайонування, слід збільшувати для хвостосховищ Кривого Рогу на 1 бал: МРЗ становить 8 балів, максимальні (пікові) прискорення –  $200 \text{ см/с}^2 (\approx 0,2 \text{ g})$ ; ПЗ слід прийняти 6 балів, максимальні (пікові) прискорення –  $50 \text{ см/с}^2 (\approx 0,05 \text{ g})$ .

Результати оцінки можливості розрідження намивних ґрунтів дозволяють стверджувати, що для рівня проектного землетрусу (ПЗ – 6 балів за шкалою МСК-64, горизонтальні пікові прискорення  $0,05 \text{ g}$ ), імовірні зміни фізико-механічних властивостей масиву в ґрунтового результаті розрідження спостерігатися не будуть. Для максимального рівня розрахункового землетрусу (МРЗ – 8 балів за шкалою МСК-64, горизонтальні пікові прискорення  $0,2 \text{ g}$ ), в деяких випадках, буде мати місце явище сейсмічного розрідження намивних ґрунтів в основі огорожувальних дамб хвостосховищ Кривого Рогу показано на Рис. 2.

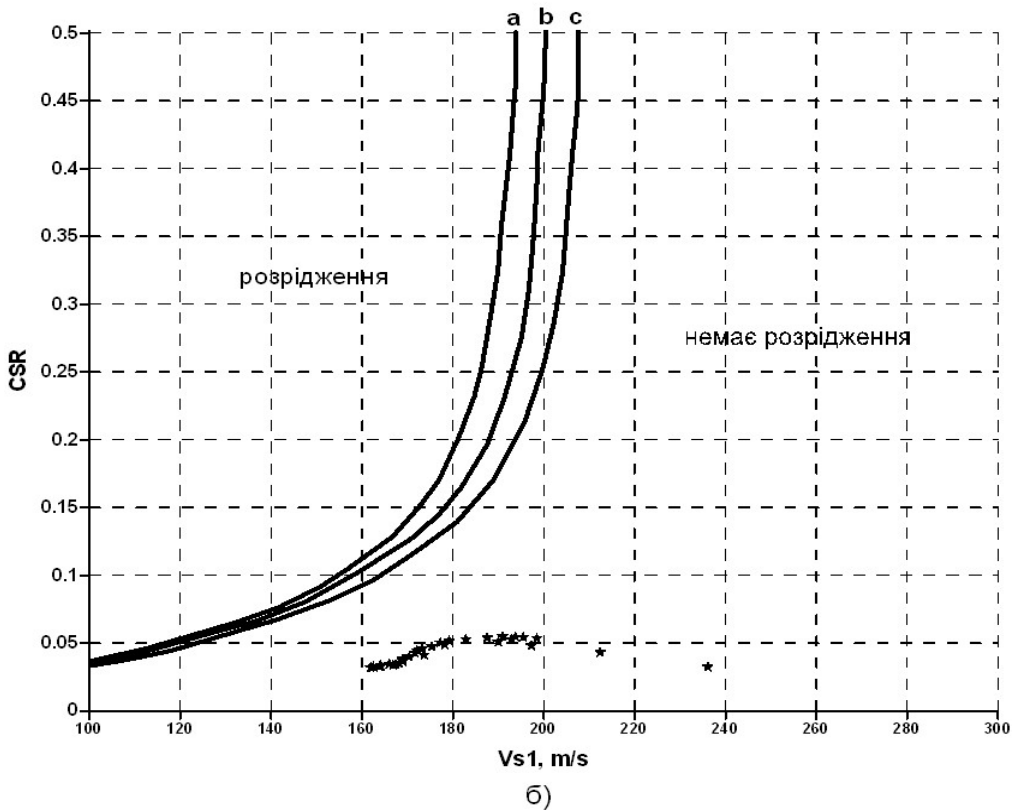
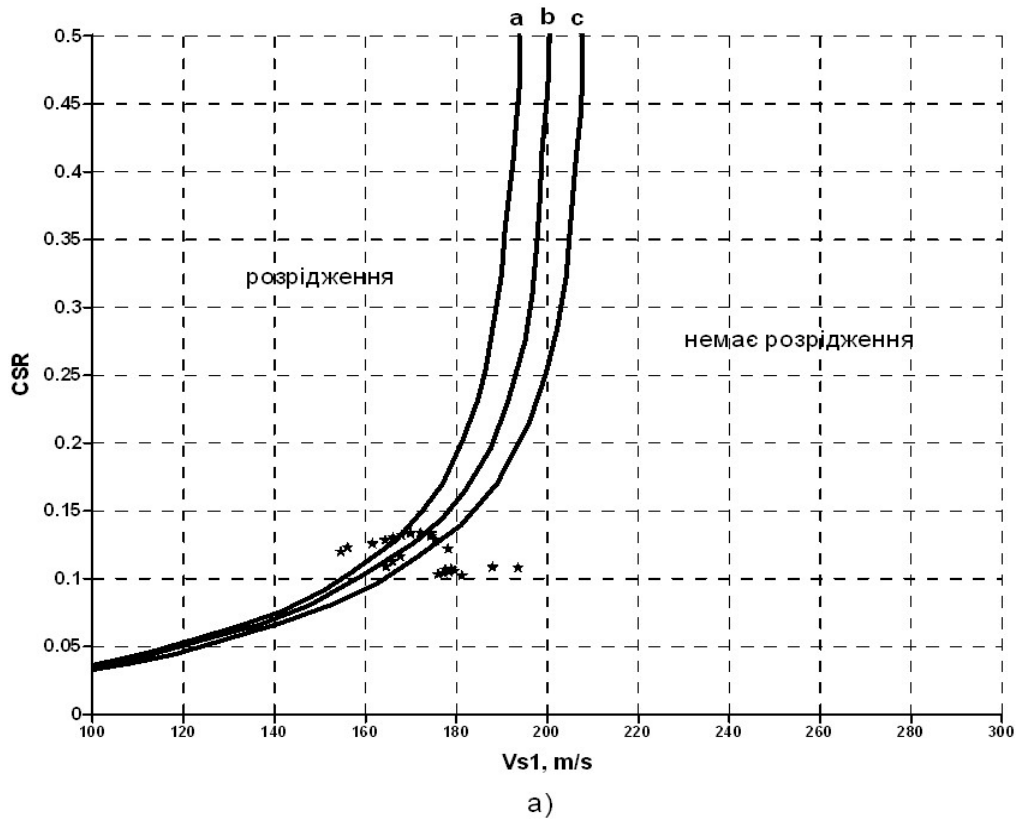
Кількісна оцінка можливості сейсмічного розрідження здійснювалася на підставі величини потенціалу розрідження  $F_S$ .

Зважаючи на те, що намивні ґрунти є чергуванням ґрунтів з різним вмістом пилувато-глинистих частинок, розрахунки потенціалу розрідження  $F_S$  здійснювалися для двох граничних значень критичної швидкості  $V^*_{s1}$ , а саме:  $V^*_{s1}=215 \text{ м/с}$  ( $F_{S1}$ ) та  $V^*_{s1}=200 \text{ м/с}$  ( $F_{S2}$ ).

Розрахунки виконувались за матеріалами польової (МЗХ) та свердловинної (ВСП) сейсморозвідки показано на Рис. 3, 4.

Основними геофізичними факторами, що визначають можливість розрідження є значення прогнозних пікових горизонтальних прискорень поверхні ґрунту та закон зміни швидкості поперечних хвиль з глибиною. Істотний вклад робить і глибина досліджуваної точки в розрізі. Для точок, розташованих на передній червінній ґрунтових вод, варіації положення РГВ і щільності ґрунту вище і нижче РГВ (для фізично реальних ситуацій) впливають на потенціал розрідження істотно менше, ніж перераховані вище фактори.

У той же час, польові сейсмічні дані МЗХ хоч і не дозволяють будувати настільки детальні швидкісні моделі, але дають можливість вивчати розподіл зон, схильних до розрідження в просторі, що виявляється неможливим при рідкій мережі свердловин з ВСП.



Вміст пилувато-глинистих частинок: а – >35%, б – 20%, с – <5%

Рис.2. Приклад візуалізації результатів прогнозування розрідження на полі CSR-Vs1: а – максимальний розрахунковий землетрус, б – проектний землетрус.

Fig. 2. Example visualization of rarefaction prediction results on the CSR-Vs1 field: a – Maximum Design Earthquake, b – Design Earthquake.



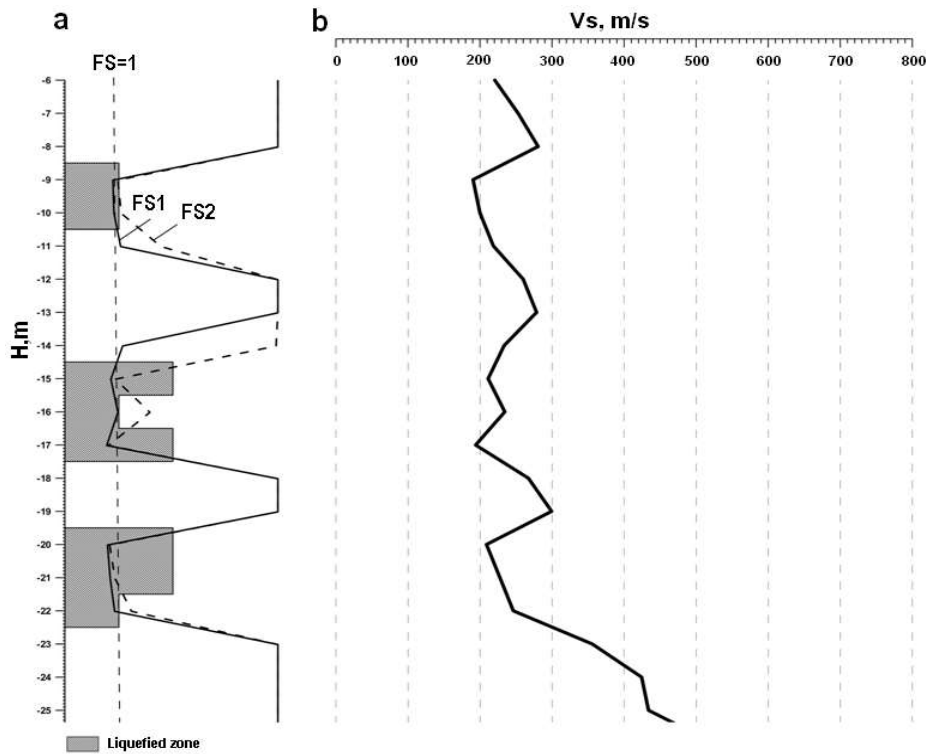


Рис.3. Приклад прогнозу розрідження техногенних ґрунтів за матеріалами свердловинної сейсмозвідки для рівня сейсмічного впливу – максимальний розрахунковий землетрус.  
 Fig. 3. Example of technogenic soil liquefaction prediction using well seismic data for seismic impact level – Maximum Design Earthquake.

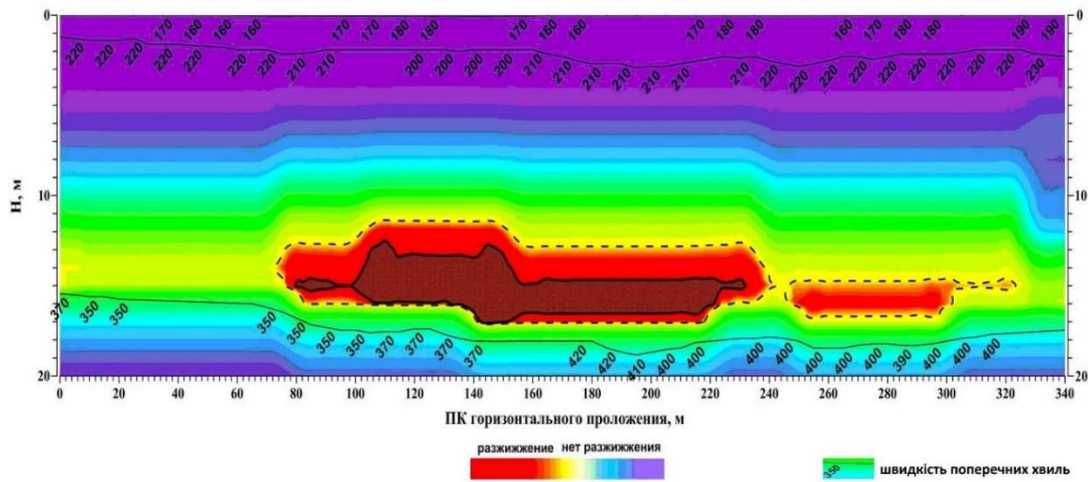


Рис.4. Приклад прогнозу розрідження техногенних ґрунтів за матеріалами польової сейсмозвідки для рівня сейсмічного впливу – максимальний розрахунковий землетрус.  
 Fig. 4. Example of technogenic soil liquefaction prediction using field seismic survey data for seismic impact level – Maximum Design Earthquake.

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Pihulevskiy, P. H., Kendzera, O. V., Babii, K. V., Anisimova, L. B., & Kyryliuk, O. S. (2023). Connection of Kryvbass tectonics with natural and technogenic seismicity. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*, (2), 5-10.
2. Pigulevskiy, P., & Svistun, V. K. (2021, September). Influence of technogenic objects on the development of landslides in the South of Kryvbass. In *Third EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.

3. Voznesensky, E. A. (1998). Earthquakes and soil dynamics. *Educational Journal of Soros*, 2, 101-108.
4. Nemchynov, I., Maryenkov, N., Babik, K., Khavkin, A., Poklonsky, V., Fesenko, O., ... & Sklyar, A. (2017). New generation building code DBNV. 1.-1-12: 2014" Construction in seismic regions of Ukraine". 6th World Conference on Earthquake (16WCEE), Santiago Chile, January 9th to 13th.
5. Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., ... & Faris, A. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. In *Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA*.
6. Ronald, D., Andrus, Kenneth H., & Stokoe K.H. Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. Vol. 126 (11).
7. Andrus, R.D. & Stokoe, K.H. "Liquefaction resistance based on shear wave velocity." Proc., (1997). NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, *National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo*, 9, 128.
8. Ronald, D., Andrus, Kenneth, H., Stokoe, Riley, M. & Chung (1999). Draft guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and simplified procedures. *Building and Fire research laboratory, National institute of standards and technology, Gaidhersburg, MD* 20899.
9. Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D. & et. al. (2001): Liquefaction resistance of soils summary report from 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soil, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, (127), 817–833.
10. Dovbnich, M.M., & Ananchenko, M.Y. (2015). Geophysical criteria for seismic liquefaction of tailings anthropogenic soils of ore-dressing and processing enterprises of Ukraine. *Naukovyi Visnyk NGU*. (1), 8-15.

### Thixotropic Properties of Hydraulic Fill Soils in Tailings Dams – Geophysical Criteria for Prediction

Iryna VIKTOSENKO  
Mykhaylo DOVBNICH

**Summary** Tailings facilities of large mining and processing plants are particularly

responsible structures the destruction of which can cause serious environmental and socio-economic consequences. One of the factors affecting the safety of the operation of such facilities is strong seismic effects caused by earthquakes of tectonic and technogenically induced nature. Tailings facilities are technogenic facilities that significantly change the engineering, geological and landscape situation of territories. Anthropogenic changes in the geological environment associated with the construction and operation of tailings facilities also significantly affect local changes in seismicity. When increasing the volume of tailings facilities, low-velocity, waterlogged technogenic soils are located at the base of the enclosing dams of subsequent tiers. When designing these structures, it is necessary to consider the possibility of soil liquefaction at their base. The paper discusses the results of testing approaches to assessing seismic liquefaction of technogenic soils using geophysical data in the conditions of tailings dumps of mining and processing plants of the Kryvyi Rih Iron Ore Basin. It is shown that the main geophysical factors that determine the possibility of liquefaction are the values of predicted peak horizontal accelerations of the soil surface and the law of change shear waves velocity with depth. The depth of the studied point in the section also makes a significant contribution. For points located below the groundwater level (GWL), variations in the position of the GWL and soil density above and below the GWL (for physically real situations) affect the liquefaction potential significantly less than the factors listed above. The prospects for geophysical assessment of the dynamic stability of soils of technogenic objects are substantiated. This approach was first tested on the territory of tailings dumps of mining and processing plants in Ukraine. We will consider the results obtained by the authors of the assessment of the possibility of seismic liquefaction of low-velocity technogenic soils based on borehole and field seismic surveys at one of the tailings dumps in Kryvyi Rih. The approach used is a promising alternative or addition to approaches based on penetration properties and will significantly increase the reliability of the forecast of the possibility of liquefaction of technogenic soils in the event of dynamic impacts of various nature.

**Keywords.** Tailings dams, hydraulic fill soils, seismic liquefaction, prediction, geophysical criteria.