

Імовірнісний аналіз сейсмічної небезпеки: досвід та перспективи виконання в Україні

Михайло ДОВБНІЧ¹, Ірина ВІКТОСЕНКО²

¹ НТУ «Дніпровська політехніка» (пр. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49 005)

² Карлів Університет (Albertov 6, Praha 2, Чеська республіка, 128 00)

¹dovbnichm@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9167-4630

²iryna.viktosenko@natur.cuni.cz, orcid.org/0009-0001-1590-2723

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.77-88

Анотація. Прагнення України інтегруватися у світовий політичний та економічний простір передбачає перехід на міжнародні стандарти.

Вимоги міжнародних нормативних документів щодо оцінки сейсмічності відрізняються від вітчизняних нормативів.

Крім того, підхід оцінки сейсмічної небезпеки в балах і наступний перехід до параметрів руху ґрунту, викликає багато запитань з боку закордонних фахівців, які виконують роль міжнародних експертів робіт з вишукувань при проектуванні об'єктів з іноземними інвестиціями, наприклад хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів, або об'єктів з міжнародним аудитом, наприклад АЕС. Ще більш актуальним це питання може виявитись у період післявоєнного відновлення України, коли для розбудови будуть залучені кошти інших країн.

Виконання міжнародних вимог передбачає проведення імовірнісного аналізу сейсмічної небезпеки (ІАСН) при проектуванні і експлуатації АЕС, великих гідротехнічних споруд, до яких відносяться об'єкти гідроенергетики та огорожувальні дамби хвостових господарств гірничо-збагачувальних комбінатів.

В Україні найбільший досвід виконання ІАСН наявний для об'єктів атомної енергетики. За участю авторів для АЕС розроблено максимально змістовна методика і програми виконання ІАСН з урахуванням геологічних, тектонічних і сейсмологічних умов України. Слід зазначити, що основні методичні положення, розроблені для АЕС, з успіхом можуть бути використані і для виконання ІАСН інших об'єктів підвищеного класу відповідальності.

Основною метою виконання ІАСН є: оцінка пікових прискорень ґрунту і отримання узагальнених спектрів відгуку для рівня проектного



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



Ірина ВІКТОСЕНКО
докторант кафедри гідрогеології, інженерної геології та прикладної геофізики Карлового університету

(ПЗ) и максимального розрахункового землетрусів (МРЗ).

ІАСН виконується на основі інтегрованої бази, що містить результати геологічних, геофізичних, геоморфологічних, тектонічних, інженерно-геологічних та сейсмологічних досліджень.

Ключовим елементом успішного виконання ІАСН є оцінка невизначеностей у вихідних даних. Характеристика вихідних даних і їх невизначеностей базується на наявній інформації.

Ключові слова. Імовірнісний аналіз сейсмічної небезпеки (ІАСН), криві сейсмічної небезпеки, спектри відгуку, акселерограми.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Оцінка сейсмічної небезпеки є невід'ємною частиною комплексу інженерних досліджень при проектуванні і експлуатації великих гідротехнічних споруд.

В даний час у світовій практиці оцінки сейсмічної небезпеки імовірнісний аналіз є

передовим підходом. Нижче наведено відомості про теоретичні основи імовірнісного аналізу сейсмічної небезпеки (ІАСН).

Оскільки одиночний сценарій землетрусу не в змозі забезпечити високий рівень надійності одержаних результатів, альтернативним підходом для оцінки сейсмічності досліджуваних майданчиків є імовірнісний аналіз сейсмічної небезпеки (ІАСН). Оцінка небезпеки методом ІАСН полягає у визначенні очікуваного рівня перевищення параметрів сейсмічної небезпеки з необхідним рівнем надійності (достовірності), із заданою імовірністю, для всіх можливих землетрусів, які, ймовірно, відбудуться протягом заданого проміжку часу (Gupta, 2007).

Як обчислювальна процедура підхід ІАСН вперше був представлений Cornell для пікового прискорення ґрунту (Gupta, 2007).

Щоб врахувати випадкову природу виникнення землетрусів, він використовував залежність Гутенберга-Ріхтера. Повторюваність землетрусів за часом Cornell розглядав як пуассонівський процес, який відповідно дотримується пуассонівського розподілу. Епіцентри можливих землетрусів рівномірно розподілялися вздовж лінійного розлому або по площі навколо досліджуваної точки спостереження, а також розглядалися як точкові джерела. Використовувалися моделі загасання, або так зване, рівняння прогнозного руху ґрунту.

Повна вірогідність перевищення властивостей сейсмічної загрози є сумою вкладів від усіх джерел землетрусів.

Імовірнісний підхід, який запропонував Cornell для оцінки сейсмічної небезпеки в сучасній літературі, трактується як класичний ІАСН. Відповідно до даного підходу, щоб обчислити ймовірність перевищення заданої амплітуди руху ґрунту на досліджуваному майданчику, вклади небезпеки інтегруються по всіх магнітудах та відстанях, для всіх сейсмогенних зон, згідно з теоремою повної ймовірності (Akkar & Bommer, 2010).

Класичний підхід для ІАСН, відомий як підхід Cornell-McGuire включає чотири кроки.

1. Ідентифікація та параметризація сейсмічних джерел, що впливають на досліджуваний майданчик. Джерела можуть бути представлені як полігони (площинні джерела), розломи (ламані лінії), точки та ін. Кожному джерелу землетрусів присвоюється рівномірний розподіл сейсмічності, припускаючи, що вогнища землетрусів будуть відбуватися в будь-якій точці в зоні джерела.

2. Характеристика магнітудного розподілу сейсмічності для джерела. Класичний підхід передбачає, що повторюваність землетрусів у часі статистично незалежна, що землетруси відбуваються з постійною частотою, а повторюваність майбутніх подій не залежить від останнього землетрусу. Найчастіше використовується модель повторюваності магнітуд – залежність Гутенберга-Ріхтера.

3. Обчислення рівняння прогнозування руху ґрунту (РПРГ) та його невизначеностей. РПРГ використовується для прогнозування руху ґрунту в точках спостереження. Обчислювані параметри в РПРГ містять пікове прискорення ґрунту, пікові швидкості ґрунту, пікові зміщення ґрунту, спектральні прискорення, інтенсивність, тривалість сильного руху ґрунту та ін. Більшість РПРГ, що доступні сьогодні – емпіричні і залежать від магнітуди, відстані джерело-майданчик, типу розлому та локальних умов майданчика. Вибір РПРГ є важливим моментом, оскільки часто РПРГ є основним фактором вкладу невизначеностей при виконанні ІАСН.

4. Реалізація та врахування різних видів невизначеностей. Наприклад, у положенні землетрусу в сейсмогенній зоні, у магнітудах, у моделях повторюваності.

Кінцевим результатом ІАСН є ймовірність перевищення заданого параметра руху ґрунту.

Випадковий характер сейсмічних подій і численні невизначеності, що входять до визначення сейсмічної небезпеки на об'єкті, роблять імовірнісний підхід до предмета дуже доцільним. У подальшому аналізі базовою фундаментальною ймовірнісною моделлю є стаціонарний процес Пуассона. Тобто поява параметра руху ґрунту на

ділянці, що перевищує заданий рівень, є процесом Пуассона, якщо припускається, що події, що викликають землетрус, також слідує за процесом Пуассона. Очевидно, це означає, що будь-яка сейсмічна подія не залежить від виникнення всіх інших, і це може бути приблизно вірним для великих землетрусів, за винятком пов'язаних з ними форшоками, афтершоками тощо.

Найчастіше в обговоренні параметра руху ґрунту розглядається пікове прискорення ґрунту (PGA), коротко позначається як випадкова величина «ag». Однак IACH, так само, застосовується і до інших параметрів руху.

Наряду з параметрами руху ґрунту, ключовими поняттями IACH є:

1. P_R – ймовірність перевищення отриманих параметрів руху ґрунту за певний вибраний час T_L . Ця ймовірність розраховується відповідно до того факту, що параметри руху ґрунту в часі наближено описуються розподілом Пуассона. Виходячи з цього, ймовірність того, що відбудеться хоча б один струс за час T_L складає $P_R = 1 - \exp(-T_L / T_R)$, де T_R – період повторення таких струсів.

2. Середній період T_R реалізації хоча б одного такого струсу, виражений у роках.

Розрахункові при IACH параметри руху ґрунту залежать від періоду повторюваності T_R та ймовірності P_R (при вибраному часі T_L). При збільшенні періоду повторюваності збільшуються розрахункові параметри руху ґрунту і зменшується ймовірність перевищення цих параметрів P_R . Наприклад, при обраному $t=50$ років для періодів 100, 500, 1000 та 5000 років, ймовірності перевищення дорівнюють 0.39, 0.095, 0.049 та 0.01 відповідно. Звичайно, зі зменшенням P_R збільшуються прогнозні параметри руху ґрунту. Тобто, виконується своєрідний принцип додатковості: щоб забезпечити мінімальний сейсмічний ризик, необхідно враховувати зростаючу небезпеку руйнування об'єктів від сильніших струсів і, що призводить до подорожчання будівництва.

Очевидно, що для проектування критичних конструкцій будуть вибрані більш консервативні параметри розрахунків

прогнозних параметрів руху ґрунту (менші значення імовірності перевищення або більш тривалі періоди повторення), чим у разі звичайного будівництва.

Наприклад, для АЕС відповідно до рекомендацій МАГАТЕ SSG-9 і національного нормативного документу НП 306.2.208-2016, оцінка сейсмічності виконується для двох рівнів:

1. проектний землетрус (ПЗ) – землетрус прогнозованої інтенсивності на майданчику атомної станції з повторюваністю один раз на 100 років для діючих енергоблоків атомних станцій та один раз на 1000 років для нових енергоблоків атомних станцій, що відповідає середньому значенню річної ($T_L=1$ рік) імовірності перевищення 10^{-2} та 10^{-3} відповідно;

2. максимальний розрахунковий землетрус (МРЗ) – землетрус максимально прогнозованої інтенсивності на майданчику атомної станції з повторюваністю один раз на 10000 років, що відповідає середньому значенню річної ($T_L=1$ рік) імовірності перевищення 10^{-4} .

Для великих гідротехнічних споруд відповідно до міжнародного нормативу ICOLD-B148, вимоги оцінки сейсмічності аналогічні.

При виконанні процедури IACH, можна розглянути кілька параметрів руху ґрунту: максимальну інтенсивність на ділянці, тривалість поштовху, пікове прискорення ґрунту (PGA), пікову швидкість ґрунту (PGV), спектральні прискорення (на структурних періодах 0,2 с, 1,0 с, 2,0 с), тощо. Методологія IACH залишається практично однаковою у всіх випадках.

IACH передбачає три основні кроки:

1. специфікацію моделей для сейсмічних джерел, що відповідають за сейсмічну небезпеку;

2. специфікацію моделей руху ґрунту, тобто рівняння загасання;

3. фактичний розрахунок шуканих імовірностей перевищення.

В ході виконання IACH отримують криві сейсмічної небезпеки для заданих проміжків часу T_L . Зазвичай розрахунки виконуються для прискорень ґрунту на різних частотах

(періодах). Сукупність кривих сейсмічної небезпеки дозволяє розрахувати спектри відгуку для заданої імовірності перевищення P_R .

Більше деталей цієї методології представлено у роботі (Gupta, 2007). Можна лише згадати, що такі питання, як врахування невизначеностей, можна вирішувати систематичним і раціональним способом, використовуючи поняття «логічного дерева», де можуть використовуватися різні альтернативи для вхідних параметрів, і кожному з них призначаються різна вага на основі експертних рішень тощо.

Зазвичай, результати IACH відносяться до корінної основи промайданчика. Наприклад, якщо брати хвостосховища Криворіжжя, розрахунки виконуються для поверхні кристалічних порід Українського щита. При оцінці сейсмічності майданчика, результати IACH повинні бути об'єднані з результатами аналізу відгуку майданчика – оцінкою впливу осадової товщі, що залягає вище.

На цей час існує широкий спектр програмних продуктів, які знаходяться у вільному доступі та можуть бути успішно використані для IACH в умовах України. До таких програмних продуктів можна віднести OpenSHA, OpenQuake Engine, EqHaz, SEISRISK III та R-CRISIS.

OpenSHA представляє собою програмне забезпечення для аналізу сейсмічної небезпеки (SHA), що є у вільному доступі та розроблене для гнучкого моделювання складних процесів землетрусів. Його головна особливість – об'єктно-орієнтована структура та підтримка як простих емпіричних моделей, так і фізично обґрунтованих сценаріїв. Проект OpenSHA є результатом спільних зусиль Southern California Earthquake Center (SCEC) та US Geological Survey (USGS) під керівництвом Ned Field, Thomas Jordan і C. Allin Cornell (Field et al., 2003).

OpenQuake Engine – це відкрите програмне забезпечення для розрахунку та оцінки сейсмічної небезпеки, ризику та підтримки прийняття рішень. Розроблений Global Earthquake Model (GEM) Foundation, OpenQuake поєднує передові наукові

методи з гнучкою та масштабованою архітектурою (Pagani et al., 2014).

SEISRISK III – це фінальна опублікована версія програмного забезпечення для розрахунку сейсмічної небезпеки, яке було активно використано для створення імовірнісних карт сейсмічної небезпеки США у період з 1972 по 1992 роки (Bender & Perkins, 1987). Однак, починаючи з 1996 року, воно було замінено більш гнучким інструментом у Геологічній службі США (USGS). Попри це, SEISRISK III продовжує використовуватись як навчальний інструмент в академічних колах і для розрахунків сейсмічної небезпеки в інших країнах.

R-CRISIS. Більш детально зупинимось на програмному комплексі R-CRISIS. Саме він входить в «Перелік дозволених до використання в ДП НАЕК «Енергоатом» розрахункових кодів для обґрунтування безпеки ядерних установок» і його було застосовано при виконанні IACH на атомних станціях України.

Перша версія CRISIS була випущена в 1986 професором Mario Ordaz (Мексика), який також є провідним автором всіх наступних версій. Перша версія була програмою, розробленою мовою програмування Fortran. Для запуску цієї версії необхідно було заздалегідь згенерувати файл вхідних даних за допомогою текстового редактора. Наступні версії були розроблені Visual Basic і включали графічний інтерфейс. У 2017 році професор Mario Ordaz продовжив розробку та підтримку комплексу CRISIS через компанію ERN (Evaluacion de Riesgos Naturales), яка займається оцінкою природних ризиків у Мексиці, перейменувавши програму на R-CRISIS (<https://ern.com.mx/web>, Ordaz & Salgado-Gblvez, 2017).

В даний час комп'ютерний програмний комплекс R-CRISIS є потужним інструментом для оцінки сейсмічної небезпеки, що містить цілісний та об'єднаний набір модулів, необхідних для роботи з даними та їх графічним відображенням під час виконання IACH.

Програмний комплекс R-CRISIS пройшов перевірку у Тихоокеанському науково-дослідному сейсмологічному центрі у 2018 році.

R-CRISIS використовується як основний інструмент IACH у різних проектах із сейсмічної небезпеки та сейсмічного ризику по всьому світу. Наприклад, для побудови та оновлення офіційних карт сейсмічної небезпеки Колумбії та Іспанії у 2009 та 2012 роках. Обчислювальний алгоритм R-CRISIS виконано на основі класичного підходу виконання IACH.

Програмний комплекс R-CRISIS використовується для IACH особливо відповідальних об'єктів АЕС, гідротехнічних споруд, тощо.

МЕТА РОБОТИ

Виконання процедури IACH в умовах хвостосховищ гірничозбагачувальних комбінатів Криворіжжя.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Оцінка сейсмічної небезпеки методом IACH полягала у визначенні очікуваного рівня перевищення параметрів сейсмічної небезпеки з необхідним рівнем надійності (достовірності), із заданою імовірністю, для всіх можливих землетрусів, які, ймовірно, відбудуться протягом заданого проміжку часу.

На сьогодні, в умовах України досвід виконання робіт з IACH є лише для об'єктів атомної енергетики. Для більш коректного викладення підходу реалізації IACH в умовах хвостосховищ гірничозбагачувальних комбінатів України виконано реалізацію для хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг.

На підставі описаної вище сейсмотектонічної моделі за допомогою програмного комплексу R-CRISIS була розрахована річна частота перевищення коливань ґрунту для 10 спектральних частот спектра відгуку при 5% загасанні, а саме: 0.333; 0.5; 1.0; 2.5; 3.33; 5.0; 10.0; 20.0; 25.0; 100.0 Гц. Пікові прискорення PGA приймалися рівні спектральному прискоренню PSA при 100 Гц. Розрахунки виконувались для прискорень заданих см/с^2 . Криві сейсмічної небезпеки розраховувались для дискретних рівнів спектральних прискорень від 1 до 2000 см/с^2 . Розрахунки

виконували для швидкісних умов кристалічного фундаменту – референтного майданика.

Невизначеність враховувалась шляхом розрахунку ризику для кожної гілки об'єднаного логічного дерева сейсмотектонічної моделі і моделі характеристики руху ґрунту. Випадкова невизначеність включена в інтегрування для кожної кривої ризику логічної гілки дерева.

Вузли «логічного дерева» визначали елементи, які повинні бути охарактеризовані, а гілки «логічного дерева» в кожному вузлі представляють альтернативні значення або інтерпретації. Відносна імовірність того, що кожна альтернатива представляє справжній стан природи, оцінювалась з використанням професійного судження і на основі ступеня, в якому альтернатива підтверджується наявними даними. Було визначено гілки логічного дерева і присвоєно відносну вагу їхнього впливу.

При розрахунках, на кожному етапі оцінювалась невизначеність і мінливість вихідних параметрів. Врахування невизначеностей виконувалося з використанням логічного дерева, що дозволило отримати криві сейсмічної небезпеки для різних квантилів.

Було враховано такі джерела невизначеності:

- різні моделі законів загасання (моделі характеристики руху ґрунту);
- різні оцінки максимальних магнітуд;
- різні види переміщень в осередку землетрусу;
- варіації статистичних законів виникнення сейсмічних подій.

Розрахунок кривих сейсмічної небезпеки виконувався для кожного шляху логічного дерева і, таким чином, кожному кінцевому стану дерева відповідає своя крива сейсмічної небезпеки. Крім цього, для кожного шляху логічного дерева існує вага, обчислена для цього шляху, а сума ваг становить одиницю. Таким чином, для кожного значення параметра руху виходить n значень річної імовірності перевищення, де n – число кінцевих станів. Середньозважене (з урахуванням відповідної ваги) значення річної імовірності перевищення, обчислене для кожного

фіксованого значення прискорення, в результаті формує середню криву сейсмічної небезпеки. Також, з урахуванням ваг визначаються криві сейсмічної небезпеки для різних квантилів.

Відповідно до світової практики для подальших розрахунків використовувались середні (середньозважені) криві сейсмічної небезпеки. Розподіл результатів небезпеки, що виник через вплив невизначеності в сейсмічному джерелі і вхідному русі ґрунту, було охарактеризовано кривими середньої сейсмічної небезпеки для спектральних частот спектра відгуку при 5% згасанні: 0.333; 0.5; 1.0; 2.5; 3.33; 5.0; 10.0; 20.0; 25.0; 100.0 Гц.

На Рис. 1 наведено порівняння кривих середньої сейсмічної небезпеки в умовах кристалічного фундаменту для хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг для спектральних частот: 0.333; 0.5; 1.0; 2.5; 3.33; 5.0; 10.0; 20.0; 25.0; 100.0 Гц.

На підставі результатів імовірнісної оцінки сейсмічної небезпеки, було побудовано рівноімовірні спектри відгуку при 5% загасанні для періодів повторюваності 100, 1000 і 10000 років. Імовірність перевищення для таких періодів повторюваності складає: річна імовірність перевищення 0.01, 0.001, 0.0001; імовірність перевищення протягом 10 років 0.1, 0.01, 0.001; імовірність перевищення протягом 20 років 0.2, 0.02, 0.002; імовірність перевищення протягом 50 років 0.4, 0.05, 0.005; імовірність перевищення протягом 100 років 0.6, 0.1, 0.01.

На Рис. 2 наведено порівняння спектрів відгуку при 5% загасанні для періодів повторюваності 100, 1000 і 10000 років в умовах кристалічного фундаменту – референтного майданчика для хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг.

Зіставлення рівноімовірних спектрів коефіцієнтів динамічності β (5% загасання) для періодів повторюваності 100, 1000 і 10000 років в умовах кристалічного фундаменту для хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК»

м. Кривий Ріг з нормативним спектром ДБН В.1.1.12:2014 для скельних ґрунтів I категорії за сейсмічними властивостями наведено на Рис. 3. Як бачимо, отримані в ході ІАСН спектри добре узгоджуються зі спектром з національного нормативу.

Для подальшого аналізу було виконано перерахунок отриманих спектрів для періодів повторюваності 100, 1000 і 10000 років на більш щільну сітку частот, що зазвичай застосовується для побудови і аналізу спектрів відгуку.

За допомогою програмного пакета R-CRISIS було виконано процедуру деагрегації результатів ІАСН за відстанню до епіцентрів землетрусів та їх магнітудою для різних періодів повторюваності: 100 років, 1000 років, 10000 років.

Ціль даної процедури – визначення вкладу в загальну середню сейсмічну небезпеку землетрусів в різному діапазоні магнітуд і відстаней до майданчика хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг.

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

- для періоду повторюваності 100 років найбільший відносний вклад створюють землетруси з магнітудою 7,0 – 7,5 на епіцентральної відстані 550 – 600 км;
- для періоду повторюваності 1000 років найбільший відносний вклад створюють землетруси з магнітудою 7,5 – 8,0 на епіцентральної відстані 550 – 600 км;
- для періоду повторюваності 10000 років найбільший відносний вклад створюють землетруси з магнітудою 7,5 – 8,0 на епіцентральної відстані 550 – 600 км, але на перший план виходять місцеві землетруси з магнітудою 5,0 – 5,5 на епіцентральної відстані 0 – 50 км.

Тобто, для малих періодів повторюваності головну роль відіграють землетруси в зоні Вранча, для великих періодів повторюваності значну роль починають відігравати місцеві землетруси.

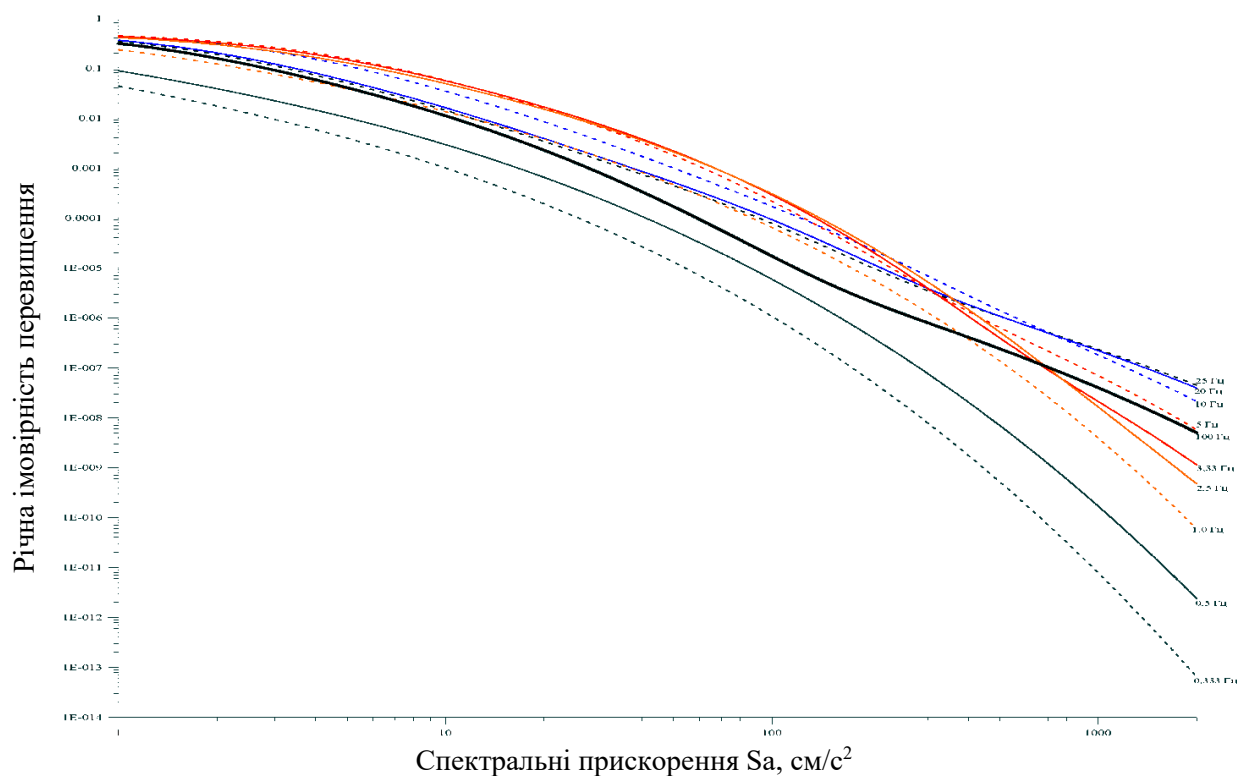


Рис. 1. Середні криві сейсмічної небезпеки в умовах кристалічного фундаменту хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг для спектральних частот: 0,333; 0,5; 1, 2,5; 3,33; 5,0; 10,0; 20,0; 25,0; 100 Гц.

Fig. 1. Average seismic hazard curves in conditions of crystalline tailings facility foundation PJSC CENTRAL GOK in Kryvyi Rih for spectral frequencies: 0.333; 0.5; 1; 2.5; 3.33; 5.0; 10.0; 20.0; 25.0; 100 Hz.

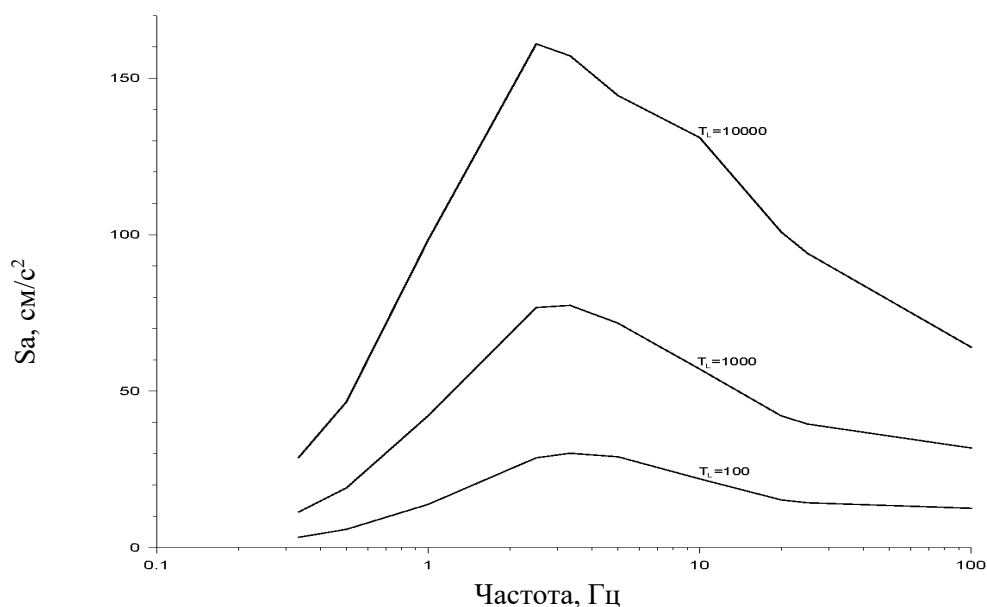


Рис. 2. Порівняння спектрів відгуку при 5% загасанні для умов кристалічного фундаменту хвостосховища ПАО «ЦГОК» м. Кривий Ріг (періоди повторюваності 100, 1000 і 10000 років)

Fig. 2. Comparison of response spectra at 5% attenuation for the conditions of the crystalline foundation of the tailings storage facility of PJSC CENTRAL GOK in Kryvyi Rih (recurrence periods of 100, 1000 and 10000 years).

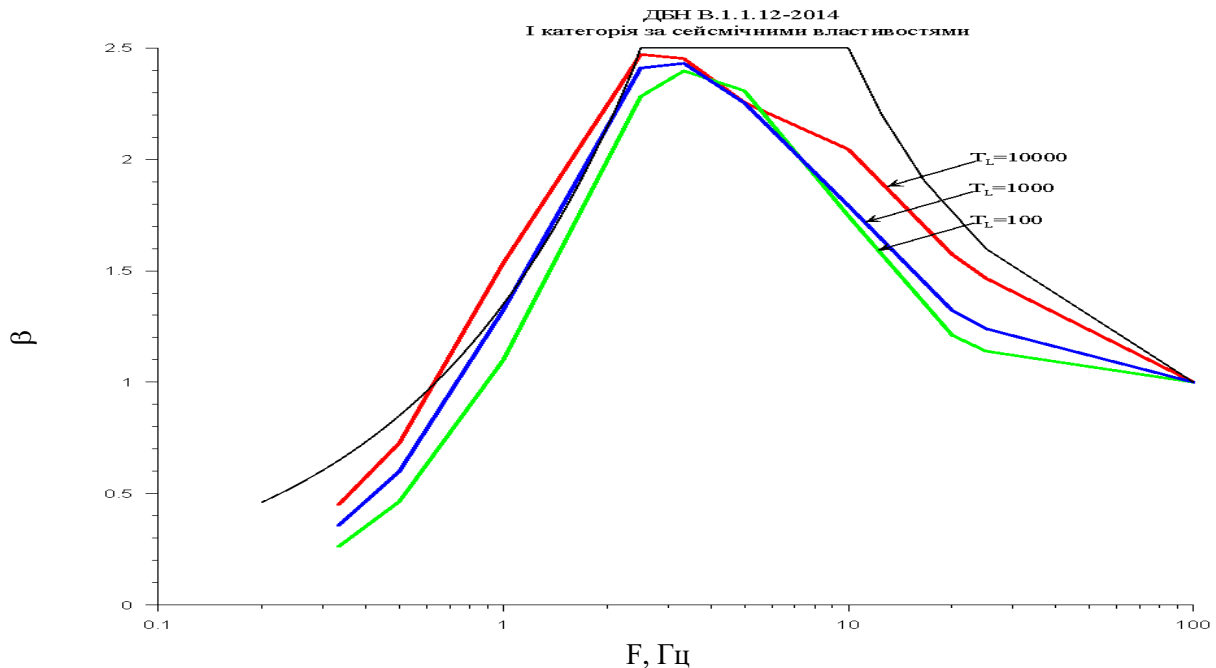


Рис. 3. Зіставлення спектрів коефіцієнтів динамічності β (5% загасання) для умов кристалічного фундаменту хвостосховища ПАО «ЦГОК» м. Кривий Ріг (періоди повторюваності 100, 1000 і 10000 років) з нормативним спектром за ДБН В.1.1.12: 2014 для скельних ґрунтів I категорії за сейсмічними властивостями.

Fig. 3. Comparison of spectra of dynamic coefficients β (5% attenuation) for the conditions of the crystalline foundation of the tailings storage facility of PJSC CENTRAL GOK in Kryvyi Rih (recurrence periods of 100, 1000 and 10000 years) with the normative spectrum according to DBN V.1.1.12: 2014 for rocky soils of category I by seismic properties.

Далі була виконана процедура з аналізу відгуку майданчика. Аналіз відгуку майданчика (АВМ) хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг було виконано для врахування впливу геологічної будови і фізичних властивостей на поширення сейсмічних коливань.

Визначався вплив на рух ґрунту при його поширенні через геотехнічну середу, специфічну для майданчика хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг зі «скелі» – покритті кристалічного фундаменту на денну поверхню.

При виконанні процедури АВМ було враховано такі джерела невизначеності:

- варіації геометричних параметрів моделі «покриття кристалічного фундаменту – вільна поверхня майданчика хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг»;

- варіації фізичних параметрів (швидкість поперечних хвиль, щільність) моделі «покриття кристалічного фундаменту – вільна поверхня майданчика хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг»;

- варіації нелінійних динамічних властивостей (зміна модулю зсуву і демпфірування матеріалу в залежності від деформації зсуву) моделі «покриття кристалічного фундаменту – вільна поверхня майданчика хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг»;

- варіації амплітуди коливань потенційних землетрусів;

- варіації частотного складу коливань потенційних землетрусів.

Першим етапом моделювання процесу трансформації вихідного сейсмічного впливу за рахунок особливостей будови і сейсмічних властивостей верхньої частини розрізу, є вибір моделі середовища і вибір моделі вихідної сейсмічної дії (акселерограми для перерахунку). При цьому використовується ряд припущень, які спрощують як модель, так і сам розрахунок, і в той же час дозволяють враховувати найбільш важливі параметри досліджуваного об'єкту.

Вибір адекватних моделей поведінки ґрунту і математичне моделювання реакції

грунту при сильних і тривалих сейсмічних впливах для різних періодів повторюваності є одним з найбільш важливих і, в той же час, проблемних питань інженерної сейсмології.

Грунт як природна багатокомпонентна система є специфічним нелінійним середовищем для поширення сейсмічних хвиль. Він змінює не тільки динамічні характеристики цих хвиль (аж до повного поглинання або перетворення типу хвилі), а й свої властивості, причому ці процеси невіддільні один від одного. Грунти здатні також змінювати частотний склад сейсмічних хвиль завдяки своїм фільтруючим властивостям. Ці ефекти обумовлені резонансними явищами, поглинанням через неідеальну пружність середовища і відбиттям хвиль на межах шарів.

Шарувате геологічне середовище діє на спектральний склад сейсмічних хвиль аналогічно частотним фільтрам різних типів в залежності від будови і фізичних властивостей самого середовища.

На поверхні ґрунтової товщі, що містить кілька шарів, спектри хвиль можуть значно відрізнятися від спектрів хвиль, що падають на нижню основу товщі (спектри на «скелі»).

Найбільш точний метод оцінки фільтруючих властивостей ґрунтової товщі заснований на визначенні її амплітудно-частотної характеристики, яка в свою чергу є функцією частоти. Амплітудно-частотна характеристика ґрунтів визначає зміни посилення коливань ґрунту.

Сучасні методи моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи дозволяють розраховувати спектральні характеристики середовища при падінні на її підоснову сейсмічної хвилі.

Для врахування епістемічної невизначеності амплітудно-частотні характеристики середовища розраховувались для геотехнічних моделей з можливими варіаціями потужності шарів, їх фізичних властивостей і законів залежності модуля зсуву і коефіцієнта загасання від деформації зсуву. Розрахунки виконувались з акселерограмами з різним частотним складом і різною амплітудою (для періодів повторюваності: 100, 1000, 10000 років).

Розрахунки виконувались за допомогою програми SHAKE. Для врахування особливостей нелінійної поведінки ґрунтів використовувалася еквівалентна лінійна модель (Schnabel, 1972, Stewart et al., 2014). Еквівалентна лінійна модель заснована на припущенні, що модуль зсуву і коефіцієнт загасання є функціями деформації зсуву. Залежності модуля зсуву і коефіцієнта загасання від деформації зсуву для кожного інженерно-геологічного елемента, що складає розріз, вибираються на підставі моделей, отриманих для різних порід (Seed et al., 1986).

На підставі отриманих амплітудно-частотних характеристик було розраховано спектри відгуку на вільній поверхні майданчика. Функція посилення спектру відгуку сейсмічних коливань на денну поверхню відносно «скелі» обчислювалась як співвідношення поверхневого спектру відгуку, отриманого з урахуванням середньої апроксимації амплітудно-частотних характеристик середовища, до спектру відгуку на поверхні кристалічного фундаменту.

Для виконання аналізу руху ґрунту в умовах хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг, результати ІАСН для поверхні кристалічного фундаменту, а саме: криві сейсмічної небезпеки (Рис. 1) і спектри відгуку (Рис. 2) було об'єднано з результатами відгуку майданчика – функцією посилення.

Основним результатом аналізу руху ґрунту в умовах хвостосховища були розрахунки узагальнених спектрів відгуку для періодів повторюваності 100, 1000, 10000 років.

Приклад узагальнених спектрів відгуку в умовах хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг для різної потужності техногенних наливних ґрунтів (період повторюваності 10000 років) і їх порівняння зі спектром на поверхні кристалічного фундаменту (період повторюваності 10000 років) наведено на Рис. 4.

Кінцевим результатом робіт з оцінки сейсмічності є синтетична акселерограма, яка враховує всі особливості сейсмічного режиму для різних періодів повторюваності та особливості відгуку майданчика.

Отримавши в результаті ІАСН узагальнені спектри відгуку, генерація синтетичної

акселерограми не представляє проблеми. Для точно заданого спектру відгуку акселерограма може бути згенерована з урахуванням відомих алгоритмів. При цьому отримують синтетичну акселерограму з випадковою

фазою (фазові кути є рівномірно розподілені випадкові величини в інтервалі від 0 до 2π).

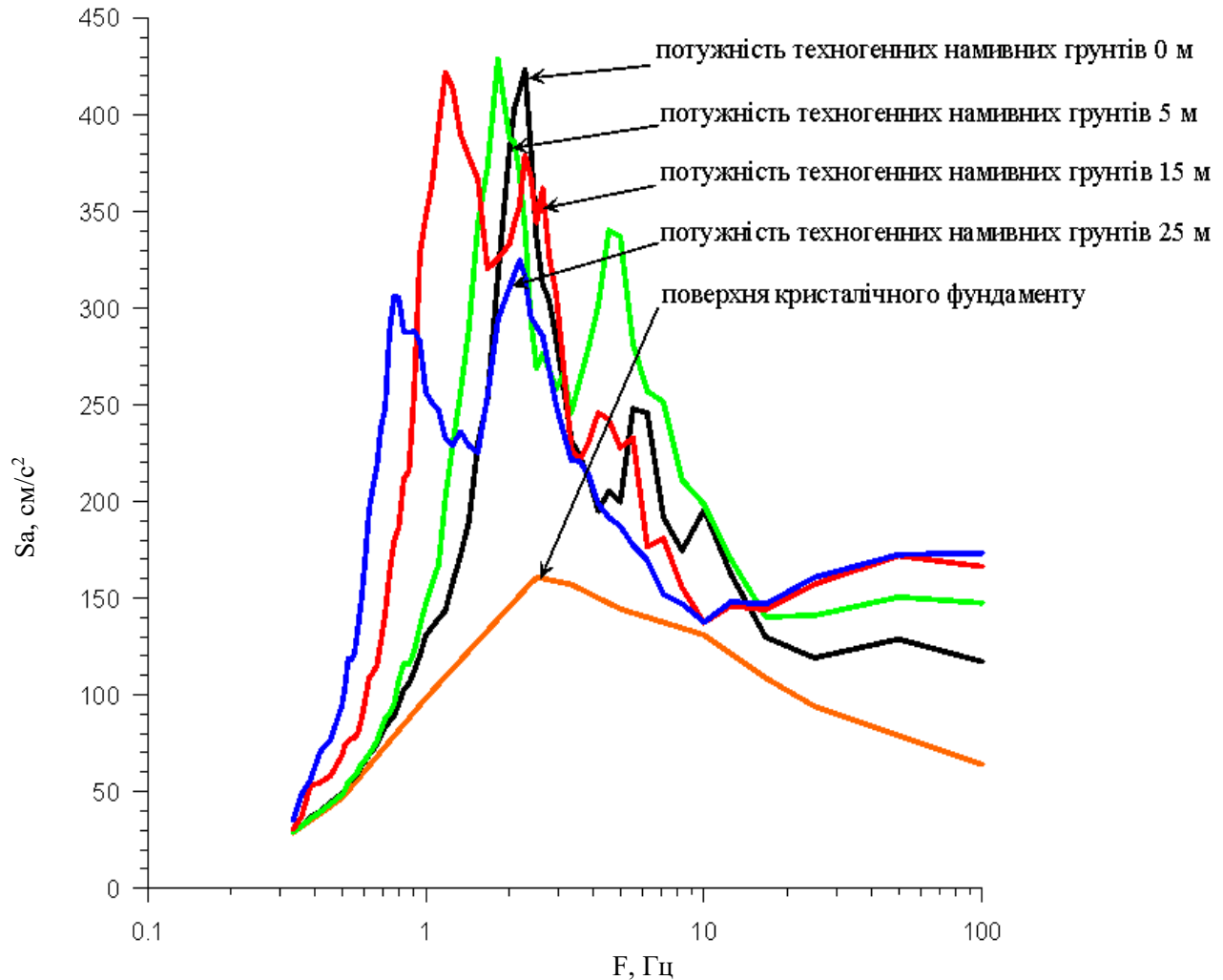


Рис. 4. Узагальнені спектри відгуку в контрольній точці майданчика хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг для різної потужності техногенних намівних ґрунтів (період повторюваності 10000 років)

Fig. 4. Generalized response spectra at the control point of the tailings storage site of PJSC CENTRAL GOK in Kryvyi Rih for different thicknesses of technogenic alluvial soils (recurrence period 10,000 years)

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В сучасний період в умовах України роботи з ІАСН, що пройшли відповідну експертизу, проведено тільки для АЕС.

Автори роботи приймали безпосередню участь у виконанні цих досліджень.

Створено інтегровану базу геолого-

геофізичних даних як основу виконання ІАСН.

Створено сеймотектонічну модель, яка описує виникнення майбутніх землетрусів, що впливають на сейсмологічну небезпеку майданчика вишукувань. Модель складається з сейсмічних джерел, що представляють об'єкти або зони, які генерують

майбутні землетруси, розподіл магнітуд і частот для кожного джерела, які описують частоту, з якою можуть відбуватися землетруси з різною магнітудою, включаючи максимально можливу магнітуду. Сеймотектонічна модель також враховує оцінену невизначеність параметрів.

Сеймотектонічна модель включає:

– моделі сейсмогенних зон (ідентифікація сейсмічних джерел та оцінка максимальної потенційної магнітуди для кожного джерела);

– моделі осередку та осередкових зон для кожної сейсмогенної зони (оцінка характеристик руйнування майбутніх землетрусів для кожного джерела);

– моделі сейсмічності (розробка співвідношення магнітуда-частота повторення землетрусу для кожного сейсмічного джерела і оцінка будь-яких залежностей серед сейсмічних джерел).

Створено моделі руху ґрунту. При розробці моделі руху ґрунту для регіону розташування майданчика вишукувань використовувався наступний загальний підхід. Визначався ряд рівнянь прогнозу руху ґрунту, які, будучи взяті разом із ваговими коефіцієнтами, дають уявлення про очікуваний, у разі майбутніх землетрусів, рух ґрунту з урахуванням невизначеності.

В сучасний період існує досвід виконання ІАСН у рамках великих міжнародних проєктів для території країн ЄС. При оцінці потенційних рівнянь руху ґрунту для моделі руху ґрунту регіону розташування майданчика вишукувань на території України було враховано висновки, отримані під час реалізації таких міжнародних проєктів, як:

– European Seismic Hazard Model - ESHM13, 2013;

– European Seismic Hazard Model - ESHM20, 2020.

Всі ці наробітки можуть бути використані як основа виконання ІАСН для будь якого об'єкту в Україні, що і було зроблено в цій роботі на прикладі хвостосховища ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг, та для побудови карт загального сейсмічного районування території нашої країни в цілому. Такі карти будуть побудовані в параметрах руху

ґрунту, а саме – пікових прискорень, і будуть відповідати вимогам європейських нормативів в галузі сейсмостійкого будівництва – Eurocode-8, що, в свою чергу, забезпечить максимально безболісний перехід на міжнародні стандарти.

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Gupta, I. D. (2007). Probabilistic seismic hazard analysis method for mapping of spectral amplitudes and other design-specific quantities to estimate the earthquake effects on man-made structures. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 44(1), 127-167.
2. Akkar, S., & Bommer, J. J. (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*, 81(2), 195-206.
3. Field, E. H., Jordan, T. H., & Cornell, C. A. (2003). OpenSHA: A developing community-modeling environment for seismic hazard analysis. *Seismological Research Letters*, 74(4), 406-419.
4. Paganì, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., ... & Vigano, D. (2014). OpenQuake engine: An open hazard (and risk) software for the global earthquake model. *Seismological Research Letters*, 85(3), 692-702.
5. Bender, B., & Perkins, D. M. (1987). *SEISRISK III: a computer program for seismic hazard estimation* (No. 1772). US Government Printing Office.
6. ERN — Earthquake Hazard Program [Електронний ресурс]: <https://ern.com.mx/web/>
7. Ordaz, M., & Salgado-Gálvez, M. A. (2017). R-CRISIS validation and verification document. *Instituto de Ingeniería—Universidad Nacional Autónoma de México & Evaluación de Riesgos Naturales: Mexico City, Mexico*.
8. Schnabel, P. B. (1972). SHAKE, a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. *Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley*.
9. Stewart, J. P., Afshari, K., & Hashash, Y. M. (2014). Guidelines for performing hazard-consistent one-dimensional ground response analysis for ground motion prediction. *PEER report*, 16, 117.
10. Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., & Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping

factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of geotechnical engineering*, 112(11), 1016-1032.

Probabilistic analysis of seismic hazard: experience and prospects of implementation in Ukraine

Mykhaylo DOVBNICH
Iryna VIKTOSENKO

Summary Ukraine's desire to integrate into the global political and economic space involves a transition to international standards.

The requirements of international regulatory documents for seismicity assessment differ from domestic standards.

In addition, the approach of assessing seismic hazard in points and the subsequent transition to soil movement parameters raises many questions from foreign specialists who act as international experts in survey work when designing facilities with foreign investments, such as tailings dumps of mining and processing plants, or facilities with an international audit, such as nuclear power plants. This issue may become even more relevant during the period of post-war reconstruction of Ukraine, when funds from other countries will be attracted for development.

Fulfilment of international requirements involves conducting a probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) during the design and operation of nuclear power plants, large hydraulic structures, which include hydropower facilities and tailing dams of mining and processing plants.

In Ukraine, the greatest experience in performing PSHA is available for nuclear power plants. With the participation of the authors, the most comprehensive methodology and programs for performing PSHA were developed for nuclear power plants, considering the geological, tectonic and seismological conditions of Ukraine. It should be noted that the main methodological provisions developed for nuclear power plants can be successfully used for performing PSHA of other facilities of increased responsibility class.

The main purpose of performing PSHA is to estimate peak ground accelerations and obtain generalized response spectra for the design level and maximum design earthquake.

PSHA is performed based on an integrated database containing the results of geological, geophysical, geomorphological, tectonic, engineering-geological, and seismological studies.

A key element of successful PSHA implementation is the assessment of uncertainties in the source data. The characteristics of the source data and their uncertainties are based on the available information.

Keywords. Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA), seismic hazard curves, response spectra, accelerograms.