

## СЕЙСМІЧНЕ ЗОНУВАННЯ КИЄВА В ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРАХ КОЛИВАНЬ ҐРУНТУ

**Мета.** Обґрунтовано необхідність побудови карт сейсмічного зонування Києва за допомогою фізичних термінів коливань ґрунту: пікових прискорень (PGA), пікових швидкостей (PGV) або пікових зміщень (PGD), які є основою для ефективного використання методів розрахунку сейсмічних навантажень на будинки, споруди та окремі відповідальні конструкції. Проміжним етапом створення таких карт є розроблення карти сейсмічного зонування (районування) території Києва в термінах відносних інтегральних оцінок спектральних приростів у сейсмічних коливаннях ґрунту, які виникають за рахунок впливу особливостей розподілу фізичних параметрів ґрунтових комплексів. Проміжна карта дає розподіл по території міста кількісної оцінки впливу спектральних характеристик ґрунтових комплексів на сейсмічну небезпеку, виражену системними фізичними величинами. **Методика.** Застосовано аналітично-емпіричний підхід до картування сейсмічної небезпеки територій. В межах території Києва методом сейсмогеологічних аналогій виділено ділянки (таксонометричні зони), на яких сейсмічний ефект може істотно відрізнятися як за фізичними параметрами – зміщення, швидкість, прискорення, так і за здатністю ґрунтових товщ суттєво впливати на спектральні характеристики ґрунтових комплексів. Для кожної таксонометричної зони побудовано розрахункову сейсмогеологічну модель із параметрами непружного деформування, які дають змогу врахувати виникнення нелінійних ефектів у разі значних сейсмічних впливів. Методом еквівалентного лінійного моделювання розраховано частотні характеристики ґрунтових моделей кожної таксонометричної зони. Розраховано усереднену амплітудно-частотну характеристику для ґрунтових умов території Києва. Побудовано карту розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва. Інтегральним коефіцієнтом спектрального підсилення прийнято площу підспектральної функції. Виконано динамічний аналіз поширення сейсмічних коливань у сейсмогеологічних моделях та проілюстровано вплив верхнього осадового шару на значення пікових прискорень ґрунту PGA на вільній поверхні. **Наукова новизна.** Вперше в межах території Києва виділено ділянки (таксонометричні зони), на яких відрізнятиметься реакція ґрунтової товщі на сейсмічний вплив. Побудовано карту розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва. **Практична значущість.** Карту сейсмічного зонування (районування) Києва в амплітудних термінах коливань ґрунту запропоновано використовувати у спектральному методі розрахунку на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу для визначення значення розрахункових відносних прискорень ґрунту досліджуваного будівельного майданчика.

**Ключові слова:** сейсмічне зонування; сейсмічна небезпека, пікові прискорення ґрунту; сейсмостійке будівництво.

### Вступ

Сучасна концепція сейсмічного захисту населення та важливих об'єктів полягає не у прогнозуванні часу виникнення землетрусу, а у сейсмостійкому проєктуванні нових та зміцненні наявних будинків і споруд, здатних забезпечити мінімізацію наслідків від майбутніх землетрусів. Заходи із сейсмічного захисту на території України регламентовано “Державними будівельними нормами України” – ДБН В.1.1–12:2014 [ДБН В.1.1–12:2014].

Невід’ємною частиною норм є карти загального сейсмічного районування (ЗСР), на яких відображено результати зонування сейсмічної небезпеки в термінах сейсмічної інтенсивності (баль-

ності), яка із імовірністю 90 % (карта А), 95 % (карта В) та 99 % (карта С) не буде перевищена у найближчі 50 років. Наведені на картах ЗСР дані одержують у результаті статистичного аналізу, прогнозування наявних макросейсмічних, інструментальних сейсмологічних, геолого-геофізичних, тектонічних та геодинамічних матеріалів, перерахованих у терміни сейсмологічної небезпеки.

Сейсмічне районування території (відображення на картах ділянок території, однорідних у сейсмічному плані й з однаковими значеннями вибраних параметрів сейсмічної небезпеки) є складною і відповідальною проблемою сучасної сейсмології, оскільки впливає на соціальну, економічну й екологічну складові сталого розвитку.

Наукова проблема полягає у тому, що прогнозування сейсмічної небезпеки належить до категорії прогнозів, які ґрунтуються на неповній інформації [Уломов, Шумилина, 1999].

Для оцінювання сейсмічної небезпеки території, залежно від класу відповідальності досліджуваного об'єкта, використовують карту А, В або С з додатка Б ДБН В.1.1–12:2014 і метод розрахунку.

Під час практичного визначення параметрів сейсмічної небезпеки території розташування конкретного об'єкта, крім результатів ЗСР, використовують уточнення параметрів сейсмічної небезпеки, одержані на основі карт детального сейсмічного районування (ДСР) та сейсмічного мікрорайонування (СМР).

У результаті робіт з ДСР уточнюють впливи, які можуть виникнути на будівельному (експлуатаційному) майданчику унаслідок землетрусів, пов'язаних із близькими потенційно сейсмоактивними зонами, вплив яких не вдалося врахувати під час розроблення карт ЗСР.

Роботи з СМР дають змогу врахувати приріст сейсмічної інтенсивності від близьких і потужних віддалених вогнищ землетрусів, що виникає за рахунок впливу локальних особливостей верхніх шарів геологічного розрізу ґрунтової товщі безпосередньо під будівельним майданчиком. На картах СМР відображають порівняно однорідні ділянки, для яких встановлюють уточнені значення сейсмічної інтенсивності (бальності) й будують модельні прогнозні значення змінної в часі поведінки повного вектора сейсмічних коливань поверхні ґрунту в термінах прискорення (акселерограми), швидкості (велограми) та зміщення (сейсмограми). При цьому враховують, що коливання ґрунту на майданчику суттєво відрізняються під час землетрусів з вогнищами в близьких та віддалених сейсмоактивних зонах. Для майданчиків на території України такою віддаленою сейсмоактивною зоною є підгорова сейсмоактивна зона Вранча, землетруси з якої потрясають практично усю територію України з інтенсивністю 9–4 бали макросейсмічної шкали MSK-64 [ДБН В.1.1-12:2014].

У 1960–2000 рр. більшість країн перейшла до сейсмічного районування (зонування) у термінах амплітудних параметрів коливань [Гусев, 2011а]: в пікових прискореннях ґрунту (Європа, Японія, Китай) або в рівнях спектра реакції (США, Канада), оскільки використання під час проектування саме цих параметрів для забезпечення сейсмостійкості будівель та споруд є коректнішим порівняно з використанням несистемних одиниць – балів сейсмічної інтенсивності.

Розрахунки відповідальних конструкцій на аварійне сполучення різних (зокрема сейсмологічних) навантажень виконують на моделях будинків і споруд із використанням: спектрального методу, прямого динамічного методу або методу

нелінійного статичного розрахунку [ДБН В.1.1–12:2014].

Найдостовірнішим із зазначених вище є прямий динамічний метод розрахунку сейсмічних напружень у моделях, оскільки він враховує особливості форми, розподіл фізичних параметрів моделі, фізичну нелінійність матеріалів та дає змогу порівняти розраховані прогнозні сейсмічні напруження із допустимими проектними напруженнями в ґрунтовій основі та відповідальних конструкціях будинків і споруд.

Для застосування прямого динамічного методу виконують роботи із сейсмічного мікрорайонування і генерують розрахункові акселерограми для ґрунтових умов конкретного будівельного майданчика. Розрахункові акселерограми враховують особливості спектральних характеристик ґрунтової товщі під будівельним майданчиком, що досліджується.

За наявності достатньо точних і обґрунтованих кількісних параметрів сейсмічної небезпеки будівельного майданчика, спеціалісти з сейсмостійкого проектування і будівництва завжди можуть створити надійні моделі сейсмостійких будинків і споруд, захищених від прогнозованих землетрусів. Цього досягають, визначаючи додаткові сейсмічні навантаження під час розрахункових землетрусів на відповідальні конструкції будинків і споруд, які не повинні перевищувати розрахункові значення. При цьому завжди є можливість мінімізувати витрати на заходи із сейсмічного захисту.

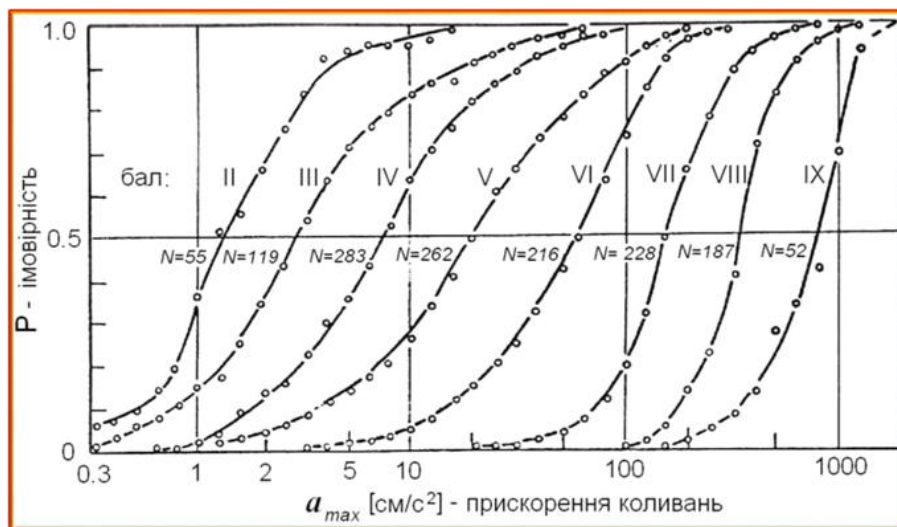
Прямий динамічний метод розрахунку на сейсмічні впливи згідно із ДБН В.1.1-12:2014 застосовують в окремих випадках (див. табл. 6.2 ДБН В.1.1-12:2014), а розрахунки за спектральним методом виконують для всіх проєктованих будівель та споруд у сейсмічних районах України. Отже, спектральний метод розрахунку на сейсмічні впливи застосовують частіше, порівняно із прямим динамічним методом розрахунку, для територій, що належать, згідно з картами ЗСР, до шестибальної зони. У разі розбіжності результатів розрахунку за спектральним і прямим динамічним методом приймають максимальні значення навантажень. Спектральний метод широко використовують у світі для розрахунків на сейсмічні впливи будівель та споруд у межах пружних моделей.

Використовуючи спектральний метод розрахунку на сейсмічні впливи згідно із ДБН В.1.1–12:2014 [ДБН В.1.1–12:2014], для визначення розрахункового значення відносного прискорення ґрунту для досліджуваного майданчика (населеного пункту) залежно від сполучень розрахункової сейсмічної інтенсивності на картах А і В використовують табл. 6.5. Такий підхід некоректний, оскільки не існує прямої залежності між інтенсивністю та прискоренням ґрунту.

Одиниця вимірювання сейсмічної інтенсивності – бал доволі ефективна в економічних розрахун-

ках, але, на жаль, малоінформативна з інженерно-будівельного погляду [Оценка..., 1988]. З додатка Д документа “Шкала сейсмічної інтенсивності” [Національний..., 2010] (див. рис. 1) випливає, що за 6 балів можуть спостерігатися максимальні

прискорення від  $3,5 \text{ см/с}^2$  до  $500 \text{ см/с}^2$ . Отже, якщо перерахувати бали в пікові прискорення ґрунту за табл. 6.5 ДБН В.1.1-12:2014, спектральний метод розрахунку на сейсмічні впливи не забезпечує достовірного результату.



**Рис. 1.** Співвідношення (статистичне) між бальністю макросейсмічної шкали і прискоренням коливань ґрунту під час землетрусів ( $N$  – кількість проаналізованих землетрусів) за Ф. Ф. Аптікаєвим [Аптікаєв, 2012]

Під час землетрусу в Японії 11.03.2011 р. на приблизно однаковій епіцентральної відстані (близько 200 км) різні сейсмічні станції зареєстрували максимальні прискорення ґрунту від  $0,3g$  до майже  $3g$  [De Luca., Chioccarelli, 2011]. Така розбіжність зумовлена різноманітністю ґрунтових умов і особливостями поширення в них сейсмічних хвиль, тобто резонансними, фільтрувальними сейсмічними властивостями ґрунтів [Кендзера, Семенова, 2016]. Приклад розподілу сейсмічного ефекту від землетрусу в Японії 11.03.2011 р. та деяких інших землетрусів показує, що інформацію про сейсмічну небезпеку територій необхідно надавати проєктувальникам і експлуатаційникам сейсмостійких споруд у фізичних одиницях коливань ґрунту, а не в балах сейсмічної інтенсивності. Цього потребують сучасні методи інженерних розрахунків будівель на аварійне сполучення із урахуванням сейсмічного впливу, який вивчають сейсмологи, надаючи дані про нього проєктувальникам.

Прогнозні значення коливань ґрунту завжди були і будуть краще сейсмологічно обґрунтованими, ніж використовувані реакції системи “ґрунт – будівля”, оскільки геофізичними методами точніше досліджують сейсмічні рухи вільної поверхні ґрунту. Проєктувальники сейсмостійких споруд, досліджуючи поведінку систем “ґрунт – будівля”, розраховують сейсмостійкість проєктованого об’єкта та змінюють моделі, визначаючи економічно найобґрунтованіший серед сейсмостійких проєк-

тів. Сейсмологи надають вихідні дані для моделювання сейсмічної реакції будинків і споруд під час проєктних землетрусів.

З 1 травня 2019 р. набрали чинності нові зміни до ДБН В.1.1-12:2014. Згідно з ними, під час будівництва будівель і споруд класу відповідальності СС2 та СС3 висотою від 73,5 м можна використовувати карту В замість С з додатка Б ДБН В.1.1-12:2014. Тобто Київ, згідно з новими змінами, для висотного будівництва належить до 5-бальної зони і відповідно доцільнішим буде спектральний метод розрахунку під час проєктування сейсмостійкого будівництва, навіть на ґрунтах, які раніше не розглядали як надійну основу. Динамічний метод розрахунку будівель та споруд на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу для вказаних об’єктів, згідно зі змінами, буде використовуватись лише за бажанням будівельників. Спектральний метод розрахунку на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу не передбачає використання бальності. Для інженерних розрахунків в цьому випадку необхідний коректний перехід від бальності до амплітудних параметрів коливань ґрунту. Оскільки найстрімкіше розвивається висотне будівництво в Києві, насамперед необхідні карти загального сейсмічного районування в фізичних одиницях коливань ґрунту для території Києва. До того ж найсприятливіші за умовами в сейсмічному плані ґрунти вже забудовані. Останнім часом висотне будівництво проєктують все частіше на наливних пісках, заболочених територіях тощо,

тобто на слабких у сейсмічному аспекті ґрунтах, і пошкодження будівель на таких ґрунтах можуть бути більшими.

Актуальність досліджень та результатів, викладених у статті, зумовлена необхідністю забезпечити проєктувальників сейсмостійкого будівництва картами сейсмічного зонування населених пунктів та агломерацій на території України в фізичних одиницях коливань ґрунту: пікових прискорень PGA (Peak Ground Acceleration), пікових швидкостей PGV (Peak Ground Velocity) або пікових зміщень PGD (Peak Ground Displacement). Розроблення карт сейсмічного зонування потребують сучасні методи сейсмостійкого проєктування та будівництва [Кендзера, 2015-а; Semenova, Kendzera, 2019].

### Методика

Найпростіший спосіб побудови карти сейсмічного зонування у фізичних одиницях коливань ґрунту оснований на використанні результатів інструментальних спостережень. Але в умовах слабкої сейсмічності достатньої кількості інструментальних даних немає. Деякі вчені застосовують кореляційні зв'язки або додаток Д документа "Шкала сейсмічної інтенсивності" [Національний..., 2010] для перерахунку бальності в фізичні одиниці коливань ґрунту. Результати такого використання викладено в таких роботах, як [Аптикаев, 2012; Уломов, 1999 та ін.]. Прямі перерахунки нормативних значень макросейсмічної бальності в амплітудні параметри коливань не враховують спектральний склад сейсмічного впливу і фільтрувальні властивості ґрунту і тому є некоректними як для використання спектрального методу розрахунку на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу, так і для надійного загального сейсмічного районування із заданою ймовірністю перевищення отриманих величин.

Для умов України в роботі запропоновано аналітично-емпіричний підхід, оскільки це єдиний спосіб, який можна реалізувати в умовах недостатньої кількості результатів інструментальних сейсмологічних спостережень. Цей підхід дає хороші результати для добре вивченої в геологічному плані території.

Проілюструємо методологію картування території великих агломерацій у фізичних одиницях коливань ґрунту на прикладі Києва.

На першому етапі побудови карти сейсмічного зонування Києва в межах території міста методом сейсмогеологічних аналогій було виділено порівняно однорідні інженерно-геологічні ділянки

(таксонометричні зони), на яких може істотно відрізнятись сейсмічний ефект. Для виділення таксонометричних зон (фізичного районування) використано геологічну карту четвертинних відкладів, дочетвертинних відкладів, геологічну карту кристалічного фундаменту та схему структурно-геоморфологічного районування. Дані отримано з каталогу фонду ДНВП "Геоінформ України" [<http://geoinf.kiev.ua/wp/kartograma.htm>]. Загалом у межах Києва виділено 16 таксонометричних зон.

Для всіх таксонометричних зон побудовано сейсмогеологічні моделі ґрунтового середовища. Сейсмогеологічна модель є відображенням геологічного середовища у вигляді просторового розподілу фізичних властивостей, які визначають поширення пружних коливань. Як правило, моделюють ізотропні середовища, сейсмічні властивості яких визначаються такими параметрами: швидкостями поздовжніх та поперечних хвиль, коефіцієнтами їх поглинання та густиною. Сейсмогеологічна модель складається з геологічних шарів (пластів) із різними фільтрувальними (резонансними) властивостями щодо сейсмічних хвиль. Складові шари можуть відповідати різним за масштабами структурно-літологічним підрозділам геологічного розрізу – від потужних комплексів гірських порід до пакетів тонких фаціальних осадових пропластків. Їх відмінні особливості – обмеження в просторі доволі простими за формою границями (підшовою та кривлею шару) і відмінністю пружних властивостей вміщувальної товщі. В умовах субгоризонтального залягання основних інженерно-геологічних елементів ґрунтового масиву для оцінювання впливу товщі осадових порід рекомендовано використовувати одновимірні (горизонтально-шаруваті моделі середовища).

Значення параметрів фізико-механічних властивостей кожного шару горизонтально-шаруватих сейсмогеологічних моделей усіх 16 таксонометричних зон, виділених у межах Києва, прийнято середнім на основі довідників [Справочник физических..., 1969; Ладынин, 2010, Goodman, 1980; Lama and Vutukuri, 1978, Физические свойства..., 1984; Дортман, 1984, Добрынин и др., 2004 та ін.]. Для кожного горизонтального шару сейсмогеологічної моделі визначено додаткові динамічні властивості для урахування особливостей нелінійної непружної поведінки ґрунтів: залежності модуля зсуву та коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації. Дані отримано на основі результатів лабораторних та польових досліджень динамічних випробувань ґрунтів, викладених у роботах [Seed, Idriss, 1970; Roblee, Chiou, 2004; Lanzot et al., 2009; Ishibashi, Zhang, 1993 та ін.]. Приклад побудованої сейсмогеологічної моделі ґрунтового середовища таксонометричної зони № 1 подано на рис. 2.

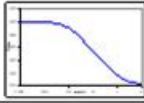
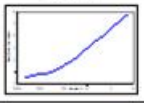
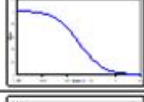
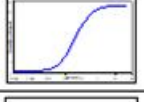
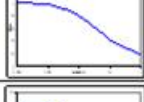
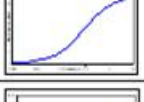
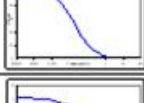
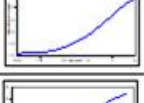
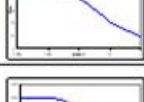
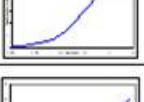
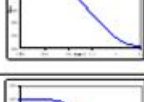
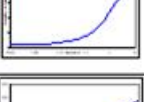
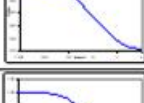
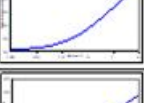
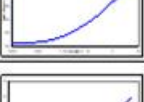
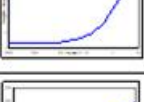
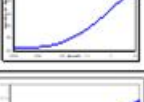
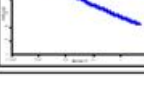
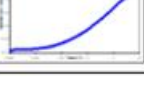
| №№<br>п/п | Літологічний<br>склад                                         |                                   | Потужні-<br>сть Н, м | Швидкість<br>поперечної<br>хвилі V <sub>s</sub> ,<br>м/сек | Густина,<br>г/см <sup>3</sup> | Параметри нелінійних властивостей                                                    |                                                                                       |
|-----------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|           |                                                               |                                   |                      |                                                            |                               | Залежність модуля<br>зсуву від амплітуди<br>деформації зсуву                         | Залежність<br>коефіцієнта<br>поглинання від<br>амплітуди деформації<br>зсуву          |
| 1         | Суглинок<br>лесовидний,<br>озерний,<br>алювіальний            | e <sub>1</sub> vdP <sub>III</sub> | 30                   | 250                                                        | 1,85                          |    |    |
| 2         | Морена,<br>супісок                                            | gP <sub>II</sub> dn               | 10                   | 280                                                        | 1,8                           |    |    |
| 3         | Суглинок<br>озерний,<br>алювіальний                           | e <sub>1</sub> vdP <sub>I</sub>   | 15                   | 250                                                        | 1,85                          |    |    |
| 4         | Піски і<br>пісковики                                          | N <sub>1</sub> np                 | 20                   | 340                                                        | 1,8                           |    |    |
| 5         | Глини<br>безкарбонат-<br>ні, мергелі<br>світло-сірі           | P2kv                              | 25                   | 600                                                        | 1,92                          |    |    |
| 6         | Піски<br>зеленувато-<br>сірі,<br>глауконіто-<br>кварцеві      | P2bc +<br>P2kn                    | 45                   | 500                                                        | 1,85                          |   |   |
| 7         | Піски і<br>пісковики,<br>кремяністі                           | K2br2                             | 15                   | 520                                                        | 1,95                          |  |  |
| 8         | Глини і<br>алеврити                                           | J2iv1+J<br>2nz+Jp<br>d            | 120                  | 650                                                        | 1,9                           |  |  |
| 9         | Піски сірі з<br>прошарками<br>алевритів,<br>вуглистих<br>глин | J2or                              | 10                   | 600                                                        | 1,95                          |  |  |
| 10        | Строкати<br>глини,<br>алевроліти,<br>пісковики                | T1dr1                             | 35                   | 1300                                                       | 2,1                           |  |  |
| 11        | Діорити                                                       | PR <sub>4</sub> zv                |                      | 2900                                                       | 2,7                           |  |  |

Рис. 2. Сейсмогеологічна модель ґрунтового середовища таксонометричної зони № 1

Прийнято вважати, що землетруси із різних сейсмоактивних зон характеризуються унікальними спектральними особливостями, що відрізняють їх від інших сейсмічних подій. Щоб підвищити достовірність моделювання розрахункових сейсмічних впливів, необхідно виконувати розрахунки, використовуючи ансамблі акселерограм, згенеровані для моделювання землетрусів із близьких сейсмоактивних зон, та для моделювання підкорових землетрусів із зони Вранча. У таких землетрусів різний спектральний склад і тривалість коливань у різних цугах сейсмічних хвиль.

Для розрахунку частотних характеристик сейсмогеологічних моделей 16 таксонометричних зон, виділених на території міста, відібрано 26 вхідних рухів у вигляді акселерограм, зареєстрованих на скельних відкладах із різним спектральним складом і різної тривалості. Амплітудно-частотний склад коливань на вільній поверхні для кожної ділянки зонування визначали перерахунком вхідних рухів із нижнього напівпростору через сейсмоґрунтові моделі, що апроксимують геологічні розрізи кожної зони.

Для урахування нелінійного деформування ґрунту використано метод еквівалентного лінійного моделювання із застосуванням програмного продукту ProShake [ProShake Ground..., 1998; Schnabel et al., 1972]. В результаті для кожної сейсмогеологічної моделі (таксономет-

ричної зони) розраховано частотні характеристики ґрунтового середовища. На рис. 3 наведено розраховані амплітудно-частотні характеристики сейсмогеологічних моделей ґрунтового середовища 16 таксонометричних зон, виділених у межах Києва.

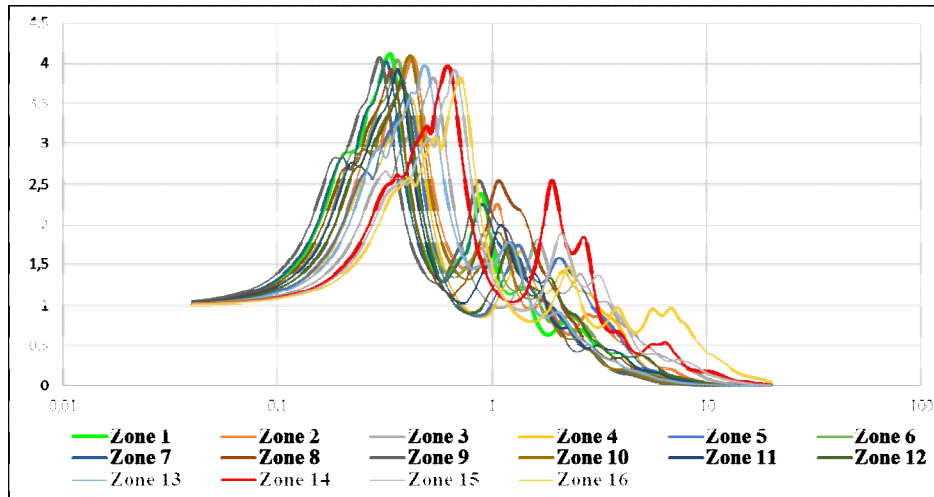


Рис. 3. Частотні характеристики ґрунтового середовища для 16 таксонометричних зон у межах Києва

Аналіз розрахованих частотних характеристик, поданих на рис. 3, показує, що вони схожі: два максимуми, перший максимум чіткий з коефіцієнтом підсилення близько 4; другий максимум частотних характеристик ґрунтової товщі є чітким лише для деяких зон. Наприклад, для зон 8 і 9. На частотних характеристиках ґрунтової товщі зон 13 та 16 видно, що другий максимум майже відсутній. Узагальнюючи опис частотних характеристик, відображених на рис. 3, можна стверджувати, що їхні форми схожі, з деякими зміщеннями пікових значень за частотою.

На наступному етапі було розраховано усереднену амплітудно-частотну характеристику для ґрунтових умов території Києва. Усереднену частотну характеристику розраховували як функцію розподілу середніх значень коефіцієнта спектрального підсилення сейсмічних коливань усіх зон за частотою.

Для кожної амплітудно-частотної характеристики розраховано інтегральні коефіцієнти спектрального підсилення. Інтегральним коефіцієнтом спектрального підсилення у цьому випадку приймали площу підспектральної функції. Перевага інтегрального коефіцієнта підсилення порівняно з максимальним полягає у врахуванні внеску кожної частоти в загальну дисперсію. Для розрахунку інтегрального коефіцієнта підсилення використано метод числового інтегрування Симпсона в інтервалі інтегрування від 0 до 20 Гц (інженерний частотний діапазон) з кроком інтегрування 0,02 Гц. На кожному кроці інтегрування використовували квадратурну формулу Симпсона:

$$\int_{x_0}^{x_2} P_2(x) dx = \int_0^{2h} P_2(z) dz = \frac{h}{3} (f_0 + 4f_1 + f_2),$$

де  $h$  – крок інтегрування 0,02 Гц.

На наступному кроці для кожної зони було розраховано відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення від середнього значення, тобто від інтегрального коефіцієнта усередненої амплітудно-частотної характеристики для ґрунтових умов території Києва. Відхилення розраховували як частку між інтегральним коефіцієнтом підсилення коливань ґрунтами кожної ділянки зонування й усередненим інтегральним коефіцієнтом підсилення.

У таблиці наведено значення відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для кожної таксонометричної зони, виділеної в межах території Києва.

**Відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для 16 таксонометричних зон території Києва**

| Таксонометрична зона (Zone) | Відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення від середнього значення |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1                           | 2                                                                       |
| Zone 1                      | 0,79                                                                    |
| Zone 2                      | 1,00                                                                    |
| Zone 3                      | 1,27                                                                    |
| Zone 4                      | 0,99                                                                    |
| Zone 5                      | 0,99                                                                    |
| Zone 6                      | 0,76                                                                    |
| Zone 7                      | 0,72                                                                    |
| Zone 8                      | 0,87                                                                    |
| Zone 9                      | 0,72                                                                    |
| Zone 10                     | 0,72                                                                    |
| Zone 11                     | 0,81                                                                    |
| Zone 12                     | 0,87                                                                    |

Продовження таблиці

| 1       | 2    |
|---------|------|
| Zone 13 | 0,79 |
| Zone 14 | 1,47 |
| Zone 15 | 1,40 |
| Zone 16 | 1,85 |

На рис. 4 наведено побудовану карту розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва. Карта відображає розподіл по території міста кількісної оцінки впливу спектральних характеристик ґрунтових комплексів на сейсмічну небезпеку, виражену системними фізичними величинами. З таблиці бачимо, що для деяких таксонометричних зон значення відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення від середнього значення однакове. Отже, на карті території Києва (рис. 4) виділено лише 12 зон із різними значеннями відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення від середнього. Побудовану карту запропоновано використовувати у спектральному

методі розрахунку на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу. Карту розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення можна використовувати для внесення поправок до спектрів сейсмічних коливань, що падають на підшву осадового чохла, або перерахованих на умовні середні ґрунти, для яких формуються розрахункові акселерограми і визначаються спектри реакції одиничних осциляторів із заданими власними періодами і загасанням коливань. Карта розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва, подана на рис. 4, є проміжним етапом побудови карт сейсмічного зонування Києва в фізичних термінах коливань ґрунту: пікових прискорень (PGA), пікових швидкостей (PGV) або пікових зміщень (PGD). Сейсмічне зонування території Києва в одиницях пікових прискорень ґрунту дасть змогу обґрунтованіше виконувати розрахунок будівель та споруд на сейсмічні впливи.

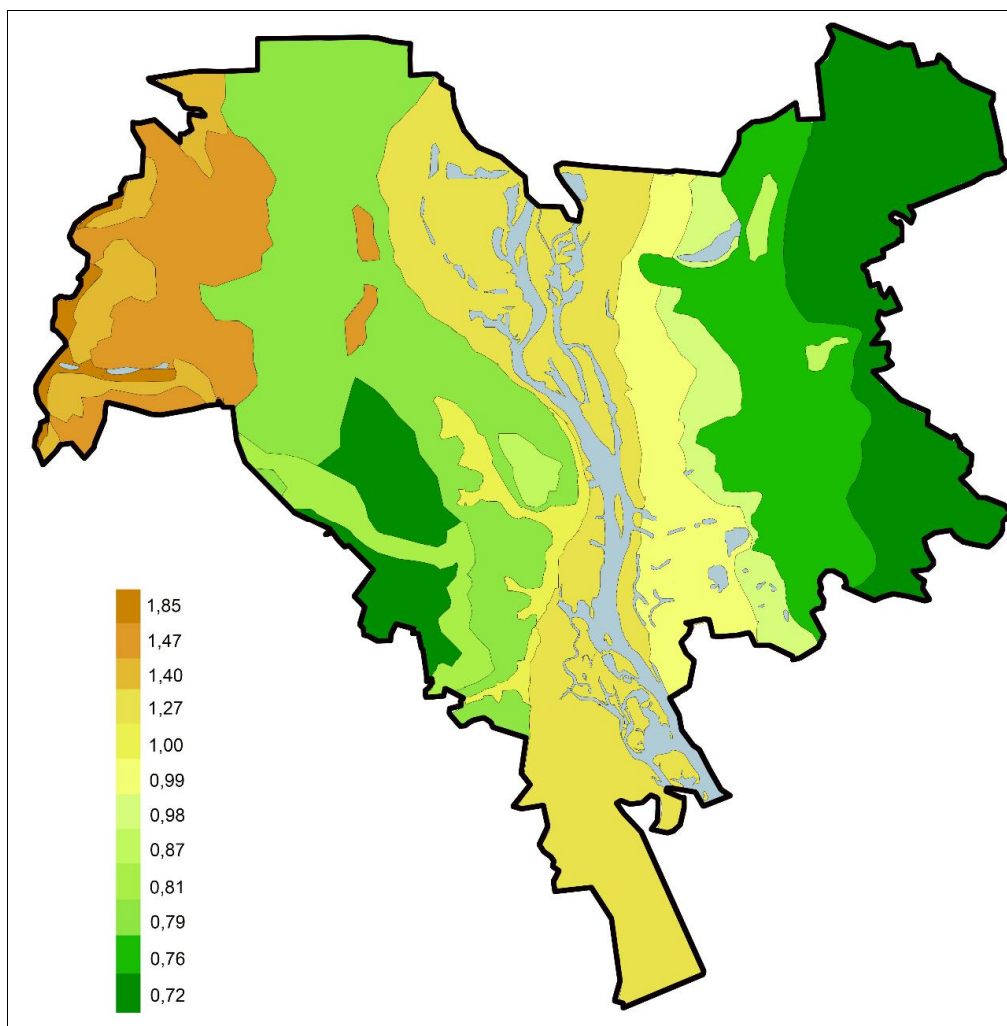
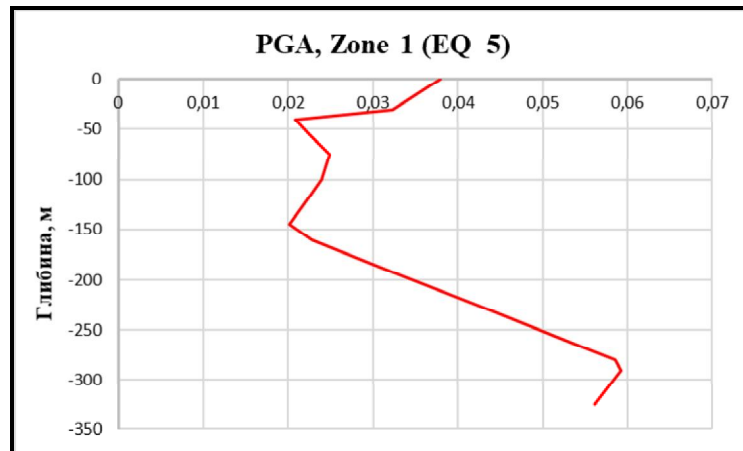


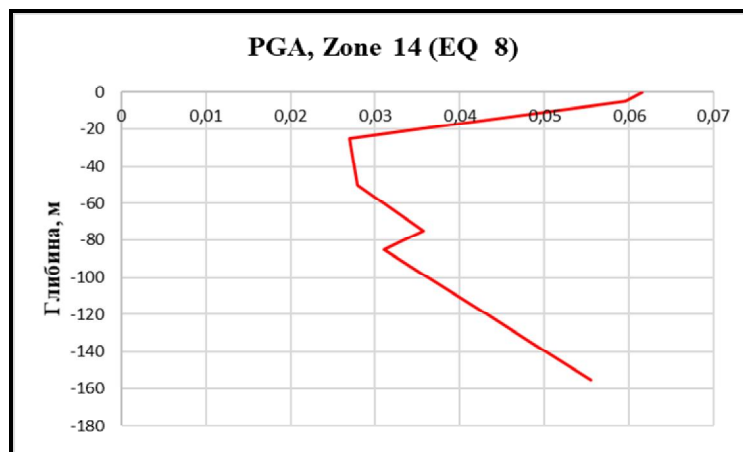
Рис. 4. Карта розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва

На рис. 5 та рис. 6 наведено графіки зміни PGA з глибиною від кристалічного фундаменту до вільної поверхні в сейсмогеологічних моделях ґрунтової товщі зони 1 та зони 14. Результати

отримано під час моделювання відгуку ґрунту на сейсмічні впливи з використанням програмного продукту ProShake [ProShake Ground..., 1998; Schnabel et al., 1972].



**Рис. 5.** Зміна PGA з глибиною у моделі ґрунтової товщі таксонометричної ділянки 1 (зони 1)



**Рис. 6.** Зміна PGA з глибиною в моделі ґрунтової товщі таксонометричної ділянки 14 (зони 14)

З рис. 5 видно, що в моделі таксонометричної ділянки № 1 амплітуда сейсмічної хвилі здебільшого зменшувалась, хоча в деяких шарах спостерігається її незначне збільшення. Загалом з десятого по третій шар значення PGA зменшилось з 0,06 g до 0,022 g. У другому та третьому шарах амплітуда збільшилась з 0,022 g до 0,038 g, але не так стрімко, як на рис. 6 у моделі таксонометричної ділянки № 14. Таке явище можна пояснити плавнішим пониженням акустичної жорсткості у верхніх шарах моделі таксонометричної ділянки № 1.

З рис. 6 видно, що в моделі таксонометричної ділянки № 14 значення PGA з шостого до третього шару зменшується, а у верхніх 25 м спостерігається різке підвищення з приблизно 0,025 g до 0,062 g. Збільшення PGA пояснюється тим, що верхні 25 м розрізу моделі ґрунтової товщі складено пухкими

низькошвидкісними породами і збільшення амплітуди коливань сейсмічних хвиль у них відбувається за рахунок резонансних ефектів, оскільки чим пухкіший ґрунт, тим більша ймовірність виникнення у ньому резонансних ефектів.

З аналізу рис. 5 та рис. 6 випливає, що детальне дослідження впливу верхнього 50-метрового шару на сейсмічний ефект на вільній поверхні може призвести як до збільшення амплітуди сейсмічних коливань (через резонансні явища), так і до зменшення (за рахунок розсіювання та поглинання енергії пружних хвиль у ґрунтах). Отримані результати ще раз доводять, що прямі перерахунки нормативних значень макросейсмічної бальності в амплітудні параметри коливань не враховують спектральний склад сейсмічного впливу та фільтрувальні властивості ґрунту і тому є некоректними як для використання спектрального методу роз-

рахунку на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу, так і для надійного загального сейсмічного районування із заданою ймовірністю перевищення отриманих значень.

### Висновки

Викладено методологію і результати комплексного дослідження, проведеного для сейсмічного районування (зонування) територій населених пунктів або агломерацій в амплітудних параметрах коливань ґрунту на прикладі території Києва. Використано аналітично-емпіричний підхід, оскільки це єдиний доступний спосіб, який можна реалізувати в умовах недостатньої кількості результатів інструментальних сейсмологічних спостережень. У межах території Києва методом сейсмогеологічних аналогій виділено ділянки (таксонометричні зони), на яких сейсмічний ефект може істотно відрізнятися. Для кожної таксонометричної зони побудовано розрахункову сейсмогеологічну модель з параметрами непружного деформування, які дають змогу врахувати виникнення нелінійних ефектів за значних сейсмічних впливів. Методом еквівалентного лінійного моделювання розраховано частотні характеристики ґрунтових моделей кожної таксонометричної зони. Розраховано усереднену амплітудно-частотну характеристику для ґрунтових умов території Києва. Побудовано карту розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва. Інтегральним коефіцієнтом спектрального підсилення прийнято площу підспектральної функції. Перевага інтегрального коефіцієнта підсилення порівняно з максимальним полягає у врахуванні внеску кожної частоти в загальну дисперсію. Карта враховує моделі загасання сейсмічних коливань в ґрунтах. Побудовану карту запропоновано використовувати у спектральному методі розрахунку будівель та споруд на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу, оскільки перерахунки бальності за шкалою сейсмічної інтенсивності (шкалою MSK-64) в амплітуду коливань ґрунту є некоректними. Карту розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення можна використовувати для внесення поправок до спектрів сейсмічних коливань, які падають на підшув осадочного чохла, або перерахованих на умовні середні ґрунти, для яких формують розрахункові акселерограми і визначають спектри реакції одиничних осциляторів із заданими власними періодами і загасанням коливань. Наведена у статті карта розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва є проміжним етапом побудови карт сейсмічного зонування Києва в фізичних термінах коливань ґрунту: пікових прискореннях (PGA), пікових швидкостях

(PGV) або пікових зміщеннях (PGD). Сейсмічне зонування території Києва в одиницях пікових прискорень ґрунту дасть змогу обґрунтованіше виконувати розрахунок будівель та споруд на сейсмічні впливи.

### Список літератури

- Аптикаев Ф. Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. Москва: Наука и образование, 2012. 176 с
- Гусев А. А. О принципах картирования сеймоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений (Часть 1). *Инженерные изыскания*. 2011а. № 10. С. 20–29.
- ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України. Київ: Мінрегіобуд України, Укрархбудінформ, 2014. 110 с.
- Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Кожевников Д. А. Петрофизика: учебник для вузов. Под ред. Д. А. Кожевникова. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Нефть и газ, 2004. 368 с.
- Дортман, Н. Б. Физические свойства горных пород и полезных. Москва: Недра, 1984. 455 с.
- Кендзера А. В., Семенова Ю. В. Влияние резонансных и нелинейных свойств грунтов на сейсмическую опасность строительных площадок. *Геофизический журнал*, 2016. № 2. С. 3–18.
- Кендзера О. В. Сейсмічна небезпека і сейсмічний захист в Україні. *Український географічний журнал*, № 3, 2015-а. С. 9–15 (<http://dx.doi.org/10.15407/ugz2015>)
- Ладынин А. В. Физические свойства горных пород. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2010. 110 с.
- Національний стандарт ДСТУ-Б-В.1.1-28:2010 “Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності”. Київ: Держбуд України, 2010. 78 с
- Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: метод. руководство по сейсмическому микрорайонированию. Отв. ред. О. В. Павлов. Москва: Наука, 1988. 224 с.
- Справочник физических констант горных пород. Под ред. С. Кларка мл. Москва: Мир, 1969. 543 с.
- Уломов В. И., Шумилина Л. С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000: объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сеймоопасных районах. Москва: ОИФЗ, 1999. 57 с.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): справочник геофизика. Москва: Недра, 1984. 455 с.
- De Luca F., Chioccarelli E., Iervolino I. (2011). Preliminary study of the 2011 Japan earthquake ground motion record V1.01.

- [http://www.reluis.it/images/stories/Japan\\_EQ\\_GM\\_Report\\_v1.pdf](http://www.reluis.it/images/stories/Japan_EQ_GM_Report_v1.pdf)
- Goodman, R. E., 1980, Introduction to Rock Mechanics: Wiley, New York.
- Lama, R. D. and Vutukuri, V. S. (1978). Handbook on Mechanical Properties of Rocks-Testing Techniques and Results: Trans Tech Publications
- ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems, Washington, USA, 1998, 54 p.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J., Seed, H. B. (1972). SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 102 p.
- Semenova Yu., Kendzera A. (2019) Calculated accelerograms for the direct dynamic method of determining seismic loads. Conference Proceedings, 18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, May 2019, Vol. 2019, p. 1–5 DOI:<https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902111>

O. KENDZERA, Y. SEMENOVA

Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, 32, Palladina Ave., Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail: [ulaska@ukr.net](mailto:ulaska@ukr.net)

#### SEISMIC ZONING OF KYIV IN PHYSICAL PARAMETERS OF SOIL OSCILLATIONS

**Purpose.** The paper substantiates the need for building seismic zoning maps of Kyiv in the physical parameters of ground motions: peak ground accelerations (PGA), peak ground velocities (PGV) or peak ground displacements (PGD), which are the basis for the effective use of methods for calculating seismic loads on buildings, structures and individual responsible constructions. An intermediate stage in the creation of such maps is the development of a map of seismic zoning of the territory of Kyiv in terms of relative integral estimates of spectral increments in seismic soil oscillations, arising from the influence of the peculiarities of the distribution of physical parameters of soils. The intermediate map gives the distribution over the city territory of a quantitative assessment of the influence of the spectral characteristics of the soil on the seismic hazard, expressed in systemic physical quantities. **Methodology.** An analytical-empirical approach to mapping the seismic hazard of territories is applied. Within the territory of Kyiv, using the method of seismic-geological analogies, areas (taxonomic zones) were identified, where the seismic effect can differ significantly both in physical parameters: displacement, speed, acceleration – and the ability of soil strata to significantly affect the spectral characteristics of the soil. **Results.** For each taxonomic zone, a computational seismic-geological model with inelastic deformation parameters has been built, which makes it possible to take into account the occurrence of nonlinear effects under significant seismic influences. Equivalent linear modeling was used to calculate the frequency response of seismic-geological soil models for each taxonomic zone. The averaged frequency response for the ground conditions of the territory of Kyiv was calculated. A map of the distribution of the deviation of the integral amplification of seismic oscillations from the average value for the territory of Kyiv was built. The integral spectral amplification is the area of the subspectral function. A dynamic analysis of the propagation of seismic oscillations in seismic-geological models is carried out and the influence of the upper sedimentary layer on the value of the peak ground acceleration PGA on the free surface is illustrated. **Originality.** For the first time within the territory of Kyiv, areas (taxonomic zones) have been identified, where the response of the soil to the seismic effect will differ. A map of the distribution of the deviation of the integral amplification of seismic oscillations by soils from the average value for the territory of Kyiv was constructed. **Practical significance.** The map of seismic zoning of Kyiv in amplitude terms of soil oscillations is proposed to be used when applying the spectral method for calculating an emergency combination of loads, taking into account seismic effects, to determine the value of the calculated relative ground accelerations of the construction site under study.

*Key words:* seismic zoning; seismic hazard, peak ground acceleration; earthquake-resistant construction.

Надійшла 05.09.2020 р.