

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.02.065>

УДК 550.34

**О.В. Кендзера, Ю.В. Семенова**

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ

E-mail: ulaskasem@gmail.com

## Спектральне підсилення сейсмічних коливань ґрунтами на території Києва

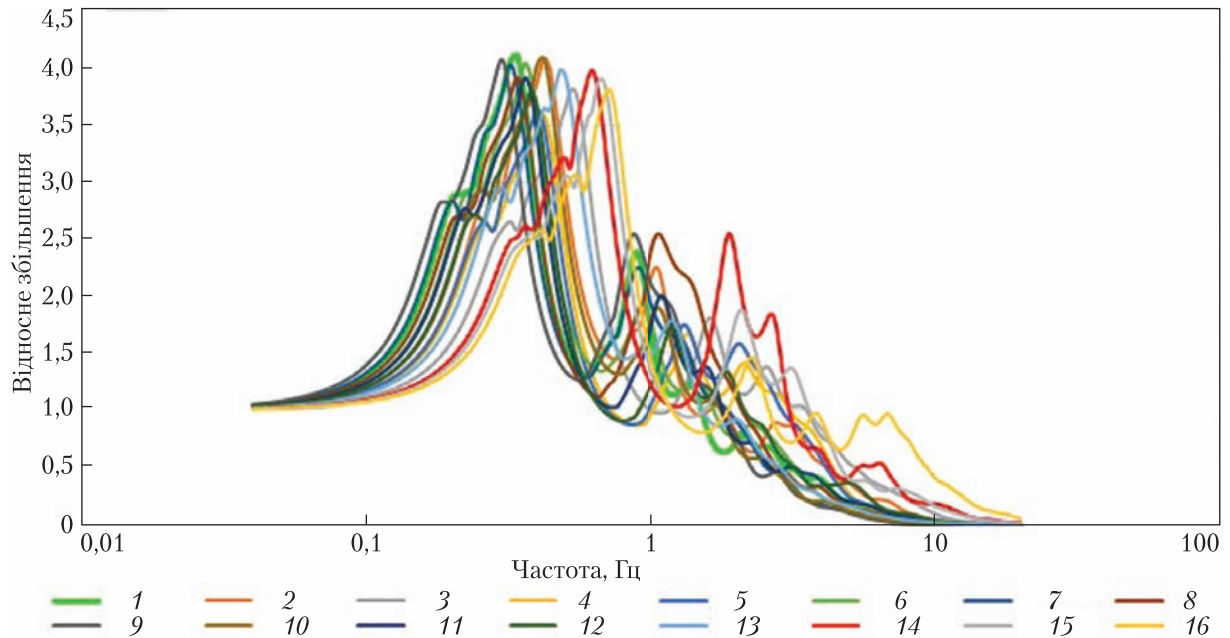
*Представлено членом-кореспондентом НАН України О.В. Кендзерою*

*Наведено результати моделювання реакції ґрунтів території Києва на сейсмічне навантаження під час землетрусів. Аналіз реакції ґрунту на сейсмічне навантаження спрямований на визначення впливу місцевих ґрунтових умов на підсилення сейсмічних коливань і, отже, оцінку спектрів реакції ґрунту для майбутніх цілей сейсмостійкого проєктування. У межах території Києва виділено відносно однорідні інженерно-геологічні ділянки (таксонометричні зони), на яких сейсмічний ефект може істотно відрізнятися. Для кожної таксонометричної зони розраховано інтегральні коефіцієнти спектрального підсилення сейсмічних коливань за рахунок впливу місцевих ґрунтових умов. Побудовано карту розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва. Запропоновану карту можна використовувати для внесення поправок у разі застосування спектрального методу розрахунку на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу для встановлення значення розрахункового відносного прискорення ґрунту досліджуваного будівельного майданчика.*

**Ключові слова:** *пікове прискорення ґрунту, підсилення сейсмічних коливань, сейсмічні локальні ефекти, сейсмічне мікрорайонування, сейсмічне зонування Києва, коефіцієнт підсилення.*

Відомо, що приповерхнева будова геологічного середовища має істотне значення в розподілі інтенсивності прояву землетрусу на вільній поверхні. Амплітуда, тривалість і частотний склад коливань будуть залежати від властивостей ґрунтової товщі і, відповідно, від законів трансформації в ній сейсмічних коливань. Дослідження історичних і сучасних землетрусів виявило, що локальні підсилення сейсмічних коливань були зумовлені резонансними та нелінійними ефектами в ґрунтах, які виникали під час проходження сейсмічної хвилі. Детальні дослідження таких руйнівних землетрусів, як у Мічоакані, Мексика, 1985 р.; Спітаку, Вірменія, 1988 р.; Ірані, 1990 р.; на Філіппінах, 1990 р.; у Нортріджі, США, 1994 р.; Кобе, Японія, 1995 р. та ін., довели, що саме локальні ґрунтові умови чинять домінуючий вплив на характер розподілу сейсмічних коливань на вільній поверхні і зумов-

Цитування: Кендзера О.В., Семенова Ю.В. Спектральне підсилення сейсмічних коливань ґрунтами на території Києва. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2020. № 2. С. 65–70. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.02.065>



**Рис. 1.** Частотні характеристики ґрунтового середовища для 16 таксонометричних зон (1–16) у межах Києва

лених ними руйнувань. Оцінка впливу приповерхневої геологічної будови на підсилення сейсмічних коливань стала невід’ємною частиною програм із зниження сейсмічної небезпеки будівельних та експлуатаційних майданчиків у сейсмічних регіонах, а також фундаментальною складовою сейсмічного районування територій.

На сьогодні існує багато методів оцінки впливу приповерхневої геологічної будови на підсилення сейсмічних коливань на вільній поверхні: експериментальні методи, емпіричні методи, чисельне моделювання та статистичний аналіз існуючих акселерометричних даних. Кожний метод має свої переваги та обмеження [1, 2]. Наприклад, чисельне моделювання дає можливість аналізувати вхідні параметри і виконувати розрахунки для великої вибірки можливих вхідних рухів. Такий підхід, однак, вимагає вичерпного розуміння як геотехнічної інформації кожної ділянки, так і особливостей проведення чисельного аналізу. Емпіричні методи традиційно використовують записи слабких або сильних сейсмічних рухів, зареєстрованих на територіях з різною місцевою приповерхневою геологічною будовою. Ці методи часто застосовуються в регіонах з помірною та високою сейсмічністю, при цьому використовують спектральні коефіцієнти підсилення сейсмічних коливань на “м’яких” ґрунтах відносно ділянок з “еталонними ґрунтами” [3].

**Оцінка локальних сейсмічних ефектів на території Києва.** У роботі наведено результати моделювання реакції ґрунтових умов території Києва на сейсмічні навантаження під час землетрусів. Аналіз реакції ґрунту на сейсмічне навантаження спрямований на визначення впливу місцевих ґрунтових умов на підсилення сейсмічних коливань [4] і, отже, на оцінку спектрів реакції ґрунту, необхідних для сейсмостійкого проектування будівель і споруд.

У межах території Києва методом сейсмогеологічних аналогій було виділено 16 відносно однорідних інженерно-геологічних ділянок (таксонометричні зони), на яких сейс-

мічний ефект може значно відрізнятись. Для виділення таксонометричних зон було використано геологічну карту четвертинних відкладів, дочетвертинних відкладів, геологічну карту кристалічного фундаменту та схему структурно-геоморфологічного районування території Києва. Дані отримано з каталогу фонду ДНВП “Геоінформ України”.

Для кожної таксонометричної зони було побудовано сейсмогеологічні моделі ґрунтового середовища. Сейсмогеологічна модель є представленням геологічного середовища у вигляді просторового розподілу фізичних властивостей, які впливають на поширення сейсмічних коливань. Сейсмогеологічна модель складається з ґрунтових шарів (пластів) з різними фільтрувальними властивостями щодо сейсмічних коливань. Значення параметрів фізико-механічних властивостей кожного шару горизонтально-шаруватих сейсмогеологічних моделей усіх 16 таксонометричних зон, виділених у межах Києва, було прийняте середнім з довідників. Для кожного горизонтального шару сейсмогеологічної моделі було визначено додаткові динамічні властивості для врахування особливостей нелінійної непружної поведінки ґрунтів: залежності модуля зсуву та коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації. Дані взято з результатів лабораторних і польових досліджень — динамічних випробувань ґрунтів, викладених у роботах [4, 5–7].

Для кожної сейсмогеологічної моделі (таксонометричної зони) було розраховано їх частотні характеристики. Розрахунки проведено методом еквівалентного лінійного моделювання з використанням програмного продукту ProShake [8]. На рис. 1 наведено розраховані амплітудно-частотні характеристики сейсмогеологічних моделей ґрунтового середовища для 16 таксонометричних зон, виділених у межах Києва.

З рис. 1 видно, що в межах Києва підсилення сейсмічних коливань за рахунок впливу місцевих ґрунтових умов очікуються переважно в частотному діапазоні від 0,16 до 0,9 Гц. На вищих частотах спостерігається другий максимум резонансного підсилення сейсмічних коливань, але вже із значно меншим коефіцієнтом підсилення. Для зниження сейсмічної небезпеки будівельних майданчиків під час сейсмостійкого проектування на території Києва варто насамперед враховувати перший максимум у частотному діапазоні від 0,16 до 0,9 Гц, оскільки близькі до цього діапазону переважаючі власні частоти мають більшість типових будівель та споруд.

На рис. 2 зображено усереднену амплітудно-частотну характеристику ґрунтових умов території Києва, яка є функцією розподілу за частотою середніх значень коефіцієнта спектрального підсилення сейсмічних коливань, розрахованих для виділених зон.

Максимальний коефіцієнт підсилення усередненої амплітудно-частотної характеристики ґрунтових умов території Києва становить 3,27 на частоті 0,36 Гц. Небезпечний частотний діапазон резонансного підсилення сейсмічних коливань ґрунтами становить від 0,16 до 0,8 Гц.

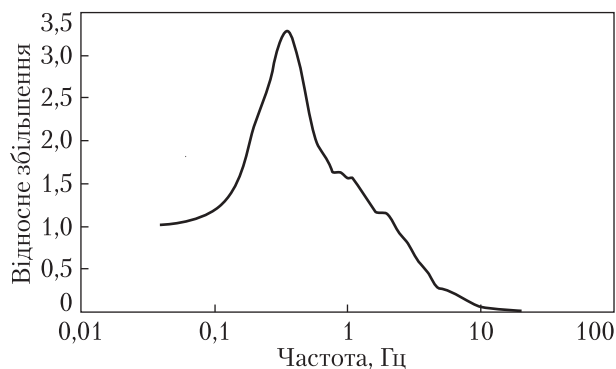
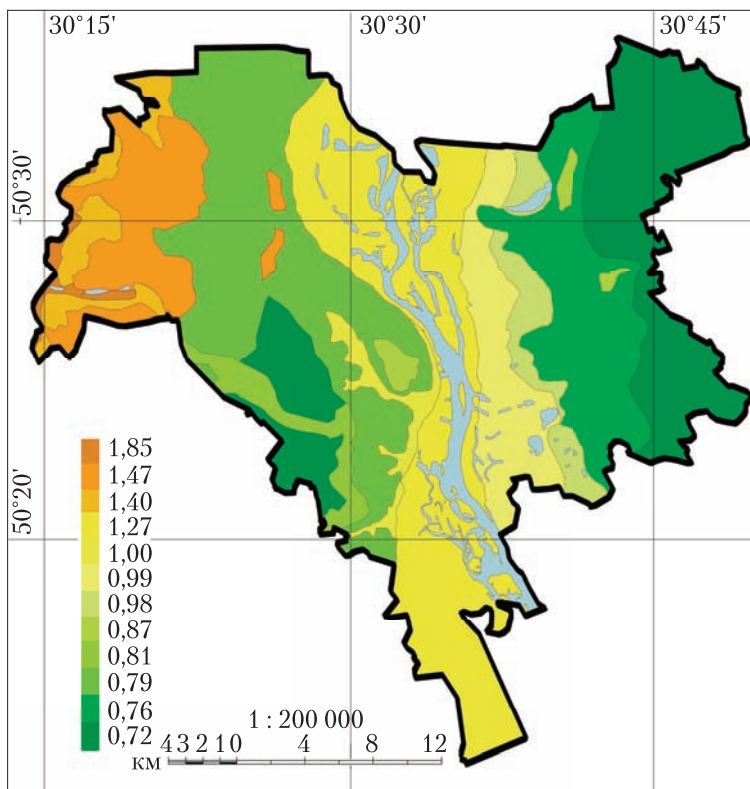


Рис. 2. Усереднена амплітудно-частотна характеристика ґрунтових умов території Києва



**Рис. 3.** Карта розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва

Для картування спектрального підсилення сейсмічних коливань за рахунок впливу локальних ґрунтових умов території Києва було розраховано інтегральні коефіцієнти спектрального підсилення усередненої частотної характеристики та частотних характеристик, наведених на рис. 1. Під інтегральним коефіцієнтом спектрального підсилення вважається площа під спектральною функцією. Перевага інтегрального коефіцієнта підсилення, у порівнянні з максимальним, полягає в тому, що в інтегральному коефіцієнті враховується внесок кожної частоти в загальний вплив. Для розрахунку інтегрального коефіцієнта підсилення використовувався метод чисельного інтегрування Сімпсона в інтервалі від 0 до 20 Гц (інженерний частотний діапазон) з кроком 0,02 Гц. 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 розраховувалось як частка між інтегральним коефіцієнтом підсилення коливань ґрунтами кожної ділянки зонування і усередненим інтегральним коефіцієнтом підсилення.

На рис. 3 зображено карту розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення для території Києва. Карту можна використовувати для прогнозування сейсмічних впливів на ділянках міста з різною геологічною будовою, за наявності розрахункових акселерограм, велісограм або сейсмограм, побудованих для “еталонних” ґрунтів.

**Висновки.** Сейсмічне зонування території конкретного будівельного майданчика виконується з використанням геолого-геофізичної і сейсмологічної інформації, отриманої в результаті інженерно-вишукувальних робіт та сейсмічного мікрорайонування досліджуваної території методами сейсмогеологічних аналогій, сейсмічних жорсткостей і методом реєстрації землетрусів, спеціальних вибухів та короткоперіодних мікросейсм. Якість сейсмічного зонування території залежить від якості і детальності цих досліджень, які, у свою чергу, необхідні для розрахунків будівель та споруд на сейсмічні впливи. Карта розподілу відхилення інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань від середнього значення рекомендується для внесення поправок до спектрів сейсмічних коливань, які падають на підшву ґрунтової товщі, або перерахованих на умовні середні (еталонні) ґрунти, для яких формуються розрахункові сейсмограми, велісограми та акселерограми, на основі яких, у свою чергу, визначаються спектри реакції одиничних осциляторів із заданими власними періодами і загасанням коливань. Карту розподілу інтегрального коефіцієнта підсилення ґрунтами сейсмічних коливань можна використовувати також для картування сейсмічної небезпеки майданчиків у фізичних одиницях коливань ґрунту: пікових прискореннях (PGA), пікових швидкостях (PGV) або пікових зміщеннях (PGD).

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кендзера А.В., Семенова Ю.В. Влияние резонансных и нелинейных свойств грунтов на сейсмическую опасность строительных площадок. *Геофиз. журн.* 2016. **38**, № 2. С. 3–18.
2. Семенова Ю.В. Моделирование реакции грунта при сейсмическом микрорайонировании строительных участков. *Геофиз. журн.* 2015. **37**, №6. С. 137–153.
3. Borchardt R.D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1970. **60**, № 1. P. 29–61.
4. Semenova Yu., Kendzera A. Seismic site effects evaluation of the Yagotin compressor station (Ukraine). *Geoinformatics: theoretical and applied aspects 2020: Proceedings of the conference (Kyiv, 11–14 May 2020)*, Vol. 2020, p. 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo091>
5. Lanzo G., Pagliaroli A., Tommasi P., Chiocci F.L. Simple shear testing of sensitive, very soft offshore clay for wide strain range. *Can. Geotech. J.* 2009. **46**, № 11. P. 1277–1288. <https://doi.org/10.1139/T09-059>
6. Roblee C., Chiou B. A proposed geindex model for design selection of non-linear properties for site response analyses. International workshop on the uncertainties in nonlinear soil properties and their impact on modeling dynamic soil response (18–19 March 2004). Berkeley, CA, 2004.
7. Vucetic M., Dobry R. Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotechn. Eng.* 1991. **117**, № 1. P. 89–107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89))
8. ProShake. Ground Response Analysis Program. Version 1.1. User's Manual. Washington, USA: EduPro Civil Systems, 1998, 54 p.

Надійшло до редакції 08.02.2021

#### REFERENCES

1. Kendzera, A.V., Semenova, Yu.V. (2016). Influence of resonance and nonlinear properties of soils on seismic hazards of construction areas. *Geophys. J.*, 38, No. 2, pp. 3-18.
2. Semenova, Yu.V. (2015). Modeling of soil reaction for seismic microzoning of building sites. *Geophys. J.*, 37, No. 6, pp. 137-153.
3. Borchardt, R.D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 60, No. 1, pp. 29-61.
4. Semenova, Yu. & Kendzera, A. (2020, May). Seismic site effects evaluation of the Yagotin compressor station (Ukraine). *Proceedings of the Conference Geoinformatics: theoretical and applied aspects 2020*, Vol. 2020, (pp. 1-6). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo091>

5. Lanzo, G., Pagliaroli, A., Tommasi, P. & Chiocci, F.L. (2009). Simple shear testing of sensitive, very soft offshore clay for wide strain range. *Can. Geotech. J.*, 46, No. 11, pp. 1277-1288. <https://doi.org/10.1139/T09-059>
6. Roblee, C. & Chiou, B. (2004, March). A proposed geoindex model for design selection of non-linear properties for site response analyses. In *International workshop on the uncertainties in nonlinear soil properties and their impact on modeling dynamic soil response*, University of California, Berkeley, CA.
7. Vucetic, M. & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotech. Eng.*, 117, No. 1, pp. 89-107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89))
8. ProShake (1998). *Ground Response Analysis Program. Version 1.1. User's Manual*. Washington, USA: EduPro Civil Systems.

Received 08.02.2021

*O.V. Kendzera, Yu.V. Semenova*

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv

E-mail: ulaskasem@gmail.com

#### SPECTRAL AMPLIFICATION OF SEISMIC OSCILLATIONS BY SOILS ON THE TERRITORY OF KYIV

The article presents the results of modeling the reaction of soil of the territory of Kiev to the seismic load during an earthquake. The analysis of the soil response to the seismic loading aims to determine the effect of local soil conditions on the amplification of seismic vibrations and, therefore, to assess the soil response spectra for future seismic design purposes. Within the territory of Kiev, relatively homogeneous engineering-geological areas (taxonomic zones) have been identified, where the seismic effect can differ significantly. For each taxonomic zone, the integral coefficients of spectral amplification of seismic oscillations are calculated due to the influence of local soil conditions. The paper presents a map of the distribution of the deviation of the integral gain of seismic vibrations by soils from the average value for the territory of Kyiv. The constructed map of the distribution of the deviation of the integral gain of seismic vibrations from the mean value by soils is proposed to be used for making corrections, when applying the spectral method of calculation for an emergency combination of loads, taking the seismic effect into account to determine the value of the calculated relative peak ground acceleration of the construction site under study.

**Keywords:** *peak ground acceleration, amplification of seismic oscillations, seismic local effects, seismic microzoning, seismic zoning of Kyiv, amplification factor.*