

**МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ  
ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТОВОЇ ТОВЩІ ПРИ  
ПРОЕКТУВАННІ СЕЙСМОСТІЙКИХ  
БУДІВЕЛЬ І СПОРУД**

Кендзера О.В., Семенова Ю.В.

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

**АНОТАЦІЯ:** В статті розглянуто підходи до визначення резонансних частот верхньої частини розрізу геологічного середовища під будівельним майданчиком для сейсмостійкого проектування. Розглядаються переваги та недоліки лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання реакції відгуку ґрунту на сейсмічні впливи при землетрусах.

**АННОТАЦИЯ:** В статье рассмотрены подходы к определению резонансных частот верхней части разреза геологической среды под строительной площадкой для сейсмостойкого проектирования. Рассматриваются преимущества и недостатки линейного, эквивалентного линейного и нелинейного моделирования реакции отклика ґрунта на сейсмические воздействия при землетрясениях.

**ABSTRACT:** The methods of determination of resonance frequencies of the upper part of the geological environment section for the building site for the needs of earthquake engineering are discussed in this paper. Advantages and disadvantages of linear, equivalent linear and nonlinear ground response modeling of seismic effects under earthquakes are considered.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** сейсмічне мікрорайонування, амплітудно-частотна характеристика ґрунтів, сейсмостійке будівництво.

Задачею сейсмічного мікрорайонування (СМР) є оцінка впливу локальних інженерно-геологічних умов будівельного майданчика на інтенсивність, форму запису і спектр коливань поверхні ґрунту при

сильних землетрусів. Ці параметри визначають характер руйнувань будівель в різних ґрунтових умовах.

Слід зауважити, що навіть при сприятливих, з точки зору сейсмічної жорсткості, умовах майданчика, не гарантується сейсмічна безпека побудованих на ньому будинків або споруд, так як у ряді випадків в ґрунтах можуть виникати резонансні ефекти (суттєве підсилення коливань на конкретних частотах).

Зокрема, такий випадок мав місце при Спітакському землетрусі 1988 р. на території міста Ленінакан у Вірменії, де приповерхневі жорсткі ефузивні породи підстигались більш рихлими товщами озерних глин, суглинків та пісків [1]. Розрахунками було встановлено, що в діапазоні низьких частот  $f < 2$  Гц мало місце помітне резонансне збільшення амплітуди коливань, що призвело до руйнувань високих каркасно-панельних будівель в Ленінакані та приміських районах. Тепер уже відомо, що руйнівних наслідків землетрусу можна було б, значною мірою, уникнути, якби при забудівлі території була добре вивчена будова верхньої 10...30 метрової товщі ґрунту та її реакція на потужні сейсмічні впливи.

Для сейсмостійкого проектування необхідно знати не лише величину інтенсивності коливань і значення максимальних пікових прискорень, а також інформацію, як сейсмічні впливи розподіляються по частоті. Відомо, що ґрунтова товща під будівельним майданчиком веде себе як фільтр: на деяких частотах ґрунтова товща передає коливання майже без змін, а на інших - або підсилює їх, або поглинає. При проектуванні сейсмостійких будівель і споруд важливо не допускати щоб максимуми частотної характеристики ґрунтової товщі співпадали з власними частотами будівель і споруд.

Частоти, яким відповідають резонансні підсилення, можна визначити з амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) ґрунтової товщі. При цьому бажано розглядати широкий діапазон частот від 0,05 до 20 Гц. Саме цей діапазон представляє найбільший інтерес при СМР, так як саме в ньому знаходяться частоти коливань основних типів будівель, споруд та їх відповідальних конструкцій, а також максимуми спектрів коливань при сильних землетрусах [2].

АЧХ верхньої частини ґрунту під будівельним майданчиком можна отримати інструментально, на основі записів коливань слабких землетрусів і мікросейсм. Реєстрація коливань слабких землетрусів не завжди є можливою в районах з низькою сейсмічністю і дає не дуже точні результати, через промислові шуми. З огляду на це, сейсмічні спостереження на будівельному майданчику зазвичай зводяться до реєстрації мікросейсм. В формуванні поля мікросейсмічних коливань, як правило, беруть участь багаточисленні природні та антропогенні джерела, вклад яких погано піддається врахуванню. Через значні похибки, метод

реєстрації високочастотних мікросейсм дає лише приблизні значення АЧХ ґрунтової товщі. Як правило, цей метод застосовується лише для оцінки приросту сейсмічної інтенсивності в балах макросейсмічної шкали.

Альтернативою інструментальним методам є розрахункові.

Слід зазначити, що розрахункові методи забезпечують достатньо точні результати лише при наявності надійних інженерно-геологічних та сейсмологічних даних про будову ґрунтової товщі будівельного майданчика, а також про літологію геологічних шарів і фізико-механічні властивості складових матеріалів. На основі зазначених даних будуються моделі ґрунтового середовища під будівельним майданчиком, які служать вхідними даними при використанні розрахункових методів визначення його частотних характеристик.

На даний час, загальноприйнятими вважаються 2 типи моделей ґрунтових середовищ: з довільними границями розділу та горизонтально шаруваті вертикально-неоднорідні моделі.

Метод скінчених елементів [3, 4], метод кінцевих різниць [5], променевий метод [6], метод Акі-Ларнер [7] – використовуються для розрахунку сейсмічних полів в моделях середовища з довільними границями розділу. Перевагою цих методів є відсутність обмежень на геометрію границь, а суттєвим недоліком – є практична відсутність можливості побудови, за реально існуючими результатами інженерно-геологічних вишукувань, моделей, які б адекватно і надійно відображали реальне середовище. З досвіду відомо, що навіть незначні похибки у параметрах складно-побудованих моделей приводять до суттєвих змін в просторовому розподілі параметрів сейсмічних полів на досліджуваному будівельному майданчику.

Отримання даних для побудови горизонтально – шаруватих моделей середовища є значно простішим і реальнішим. Розраховані в таких моделях поля є стійкіші до похибок у вхідних даних. У зв'язку з цим, використання саме таких моделей передбачається ДБН В.1.1.-12:2014 та Eurocode 8. Для розрахунків частотних характеристик горизонтально-шаруватих моделей геологічного середовища використовується матричний метод Томпсона-Хаскела [8]. На даний час існує ряд програмних продуктів, в основі алгоритмів яких лежить зазначений метод: MTC [9], ProShake [10], EERA [11] тощо.

При моделюванні реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи можна використовувати лінійний або нелінійний підхід. Лінійний – описується лінійно-пружною моделлю реакції середовища. Вважається, що при динамічних навантаженнях процеси в ґрунтах будуть відповідати лінійній частині графіка закону Гука (залежності напруження-деформація). Але при інтенсивних сейсмічних впливах в ґрунтах виникають явища, які не можуть бути описані лінійною теорією пружності. Нелінійність

залежності між напруженнями та деформаціями в ґрунтах при достатньо високих напруженнях призводить до того, що при збільшенні інтенсивності землетрусу порушується пропорційність між напруженнями та деформаціями, настає явище насичення, коли напруження зростають повільніше, ніж при менших значеннях деформацій. Значення напружень, при яких зникає пропорційність залежності між напруженнями та деформаціями, є порогом пружності. Поріг пружності для різних категорій ґрунтів є різним [12] і визначається, в першу чергу, поглинанням ґрунтами сейсмічної енергії [13]. Тому, для аналізу реакції ґрунту на сейсмічні впливи, останнім часом, значна увага приділяється нелінійним підходам [1, 12, 14].

Механізми лінійних перетворень сейсмічних хвиль в приповерхневій ґрунтовій товщі, які приводять до підсилення коливань і резонансних явищ, вивчені достатньо добре. На відміну від нелінійних механізмів, вони в повній мірі враховуються в практиці сейсмічного мікрорайонування. Оскільки сейсмічне мікрорайонування зазвичай проводиться для територій, які можуть піддаватись впливам сильних землетрусів, адекватне врахування нелінійного відгуку ґрунту є необхідним [14]. Відгук ґрунту можна вважати лінійним при слабких сейсмічних впливах. При впливах високої інтенсивності, вклад нелінійності буде залежати від величини сейсмічних деформацій [12, 14].

Нелінійність відгуку приповерхневої ґрунтової товщі призводить як до зміни спектрального складу сейсмічних коливань, іноді дуже суттєвої, так і до зміни підсилення сейсмічних коливань [14]. При достатньо високій інтенсивності коливань починають діяти нелінійні механізми поглинання, які призводять до послаблення коливань на високих частотах, але не послаблюють при цьому низькочастотні коливання. Зміни спектрального складу коливань на поверхні, пов'язані з нелінійністю відгуку ґрунту, проявляються в зміщенні резонансних частот в низькочастотну область. Підсилення сейсмічних коливань на поверхні зменшуються внаслідок нелінійності відгуку ґрунту, порівняно з лінійним відгуком в сухих ґрунтах (при заляганні ґрунтових вод на глибині 10 м і більше). У водонасичених ґрунтах (коли рівень ґрунтових вод знаходиться на глибині менше 10 м) таке підсилення є менш помітним. Зазначені висновки зроблено як на основі аналізу реальних записів сильних землетрусів, так і за результатами чисельного моделювання [14].

В практиці сейсмостійкого будівництва США широко використовується еквівалентне лінійне моделювання відгуку ґрунту на сейсмічні впливи [15]. Ґрунт розглядається як лінійний в'язкопружний матеріал, а його нелінійні властивості враховуються шляхом введення залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації зсуву. Такі залежності підбираються для кожного шару моделі ґрунтового

середовища окремо, за даними інформації про літологічний склад і глибину залягання шарів ґрунту, одержаними на основі результатів лабораторних досліджень. Наприклад, за даними робіт [16 - 20] і подібних.

Еквівалентне лінійне моделювання використовується в програмах SHAKE, PROSHAKE, QUD-4, FEDAM, LUSH, FLUSH, EERA, FDEL тощо. Алгоритми програм викладено в публікаціях [10, 15].

На рис.1 приведено АЧХ ґрунтового середовища під будівельним майданчиком на перетині вулиць Червоногвардійської та Краківської в м. Києві отриману: а) лінійним моделюванням, в) еквівалентним лінійним моделюванням з використанням програмного комплексу ProShake. Видно, що АЧХ при лінійному моделюванні (при якому декремент поглинання вважається сталою величиною для кожного шару) відрізняються від АЧХ отриманої за допомогою еквівалентного лінійного моделювання (в якому враховується, що коефіцієнт поглинання і модуль зсуву залежать від рівня деформації).



Рис. 1. Амплітудно-частотна характеристика ґрунтового середовища під будівельним майданчиком на перетині вулиць Червоногвардійської та Краківської в м. Києві отримана а) лінійним моделюванням, в) еквівалентним лінійним моделюванням з використанням програмного комплексу ProShake

При лінійному моделюванні відгуку ґрунту на сейсмічні впливи відбувається лише амплітудна трансформація частотних складових вихідного спектра, а при еквівалентному лінійному моделюванні, як видно з рис. 1, абсолютні максимуми зміщуються в область нижчих частот.

Розрахунок результатів передачі через ґрунтове середовище записів реальних землетрусів, з використанням методів лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання, проводились багатьма вченими [21-26]. Було зроблено висновки, що лінійне моделювання часто призводить до появи неправдивих резонансів. Схожість результатів еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання залежить від ступені нелінійності відгуку ґрунту. Обидва методи дають гарні результати реальної оцінки відгуку ґрунту при невеликих деформаціях, а, при дуже великих деформаціях, нелінійне моделювання дає кращі результати.

Очевидним є висновок, що, обравши неправильний підхід до моделювання відгуку ґрунту на сейсмічні впливи від землетрусів, можна отримати хибні значення резонансних частот ґрунтової товщі, що під час землетрусу може призвести до руйнування будівлі внаслідок не врахованих при проектуванні резонансних ефектів.

Для умов України слід перевірити на практиці важливі висновки відомого вченого [12], згідно яких, при моделюванні відгуку ґрунту на сейсмічні впливи, при розрахунковій сейсмічній інтенсивності до 9 балів включно, для ґрунтів I категорії можна використовувати лінійну залежність між напруженнями і деформаціями. Для ґрунтів II категорії - можна припускати лінійну залежність до інтенсивності 8 балів. А для ґрунтів III і IV категорії - нелінійність повинна враховуватися, починаючи з 6-7 балів. Таким чином, з врахуванням карти загального сейсмічного районування території України, для будинків і споруд класу відповідальності ССЗ лінійне моделювання при сейсмічному мікрорайонуванні будівельних майданчиків на території України допускається проводити лише для ґрунтів I і II категорії. А для ґрунтів III і IV категорії слід враховувати їх можливу нелінійну поведінку.

**Висновки:** Сучасна парадигма сейсмічного захисту будівель і споруд в сейсмічних районах передбачає перехід від інтенсивного застосування все міцніших будівель і споруд, спроектованих з більшою кількістю сталі і бетону, до використання даних про частотні характеристики ґрунтової товщі в основі цих будівель, з метою уникнення збігання власних періодів сейсмічних коливань, підсинюваних локальними ґрунтовими умовами, з власними періодами коливань будинків і споруд. Такий підхід гарантує не лише їх високу сейсмостійкість, але і мінімізує затрати на заходи сейсмічного захисту. Досвід показує, що в наявних в Україні сейсмічних умовах найперспективнішими є методи еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи. Для покращення практики їх ефективного застосування необхідно переглянути нормативні документи з інженерно-геологічних вишукувань під будівництво.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населённых пунктов и больших строительных площадок / Заалишвили В.Б. – М.: Наука, 2009. - 350 с.
2. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию / ред. О.В. Павлов - М.: Наука, 1988. - 223 с.
3. Гогелия А.А. Применение метода конечных элементов при сейсмическом микрорайонировании / Гогелия А.А., Напетваридзе Ш.Г. // Сейсмическое микрорайонирование. - М.: Наука, 1977. – С. 161-164.
4. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Галлагер Р. - М.: Мир, 1984. - 431 с.
5. Luco E.J. Three-dimensional response of a cylindrical crayon in a layered half-space / Luco E.J., Wong H.I., and F.C.P. de Barros // Earthquake Eng. Struc. Dynamics, V.19, 1990. - P. 799-817.
6. Аки К. Количественная сейсмология: Теория и методы / Аки К., Ричардс П. - Т.2.- М.: Мир, 1983. – 359 с.
7. Horike M. Seismic response in three-dimensional sedimentary basin due to S-wave incidence / Horike M., Uebayashi H. and Takeuchi Y. // J. Phys. Earth, V.38, 1990. - P. 261-284.
8. Haskell N.A. Asymptotic Approximation for the Normal Modes in Sound Channel Wave Propagation / Haskell N.A. // J. Appl. Phys., V.22, 1951.- P.157-168.
9. Ратникова Л.И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах / Ратникова Л.И. – М.: Наука, 1973. - 124 с.
10. Schnabel P.B. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites / Schnabel P.B., Lysmer J., and Seed H.B. // Report No. EERC 72-12. - Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1972. – 102 p.
11. Bardet J.P. EERA a Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits / Bardet J.P., Ichii K. and Lin C.H. // University of Southern California, Department of Civil Engineering, 2000. - 40 p.
12. Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов / Алешин А.С. - М.: ООО "Светоч Плюс", 2010. – 293 с.
13. Вознесенский Е.А. Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах / Вознесенский Е.А., Кушнарева Е.С., Фуникова В.В. – М.: Издательство ФЛИНТА, 2014. – 104 с.
14. Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет / Павленко О.В. - М.: Научный мир, 2009. - 260 с.

15. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering / Kramer S.L. // N.J., Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996. - 672 p.
16. Hardin B.O. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves / Hardin B.O., Drnevich, V.P. // Journal of the Soils Mechanics and Foundation Engineering Division. ASCE. - V.98, № SM7, 1972. - P. 667-692.
17. Ishibashi I. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay / Ishibashi I. and Zhang X. // Soils and Foundations, V.33, No.1, 1993. - P.182-191.
18. Simple shear testing of sensitive very soft offshore clay for wide strain range / [Lanzo G., Pagliaroli A., Tommasi P., Chiocci F.L.] // Canadian Geotechnical Journal, V.46. № 11, 2009. - P. 1277-1288.
19. Vucetic M. Effect of soil plasticity on cyclic response / Vucetic M., Dobry R. // Journal of Geotechnical Engineering. - V.117, 1991. - P. 89-107.
20. Seed H.B. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential / Seed H.B., Idriss I.M. // Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. V.97, № SM9, 1971. - P. 1249-1273.
21. Joyner W.B. Calculation of nonlinear ground response in earthquakes / Joyner W.B., Chen T.F. // Bull. Seism. Soc. Am., V.65, No.5, 1975. – P.1315-1336.
22. Martin P.P. MASH – a computer program for the nonlinear analysis of vertically propagating shear waves in horizontally layered soil deposits / Martin P.P. and Seed H.B. // Report No. UCB/EERC-78/23. - Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1978.- 96 p.
23. Dikmen, S. Effective Stress Analysis of Seismic Response and Liquefaction: Theory / Dikmen, S. and Ghaboussi, J. // J. Geotech. Engrg., 110(5), 1984. - P.628–644.
24. Kokusho T. Dynamic deformation characteristics of soil and nonlinear response of ground / Kokusho T. // Report no. 301. Central Electric Research Institute, 1990. - P. 207-240.
25. Kokusho T. Dynamic characteristics of ground. Lecture: Analytical method of the interaction between ground and structure / Kokusho T. - Tsuchito-Kiso, 40 (4), 1992. – P.76-84.
26. Iwasaki Y. Strong Motion Records at Kobe Port Island / Iwasaki Y., Tai M. // Special Issue of Soils and Foundations, 1996. - P. 29-40.

## REFERENCES

1. Zaalishvili V.B. Seismic micro zonation of urban territories, settlements and large building sites / Zaalishvili V.B. - Moscow: Nauka, 2009. – 350 p.



2. Assessing the impact of ground conditions on the seismic hazard. Toolkit for seismic micro zoning / Eds. O.V.Pavlov. - Moscow: "Nauka", 1988. – 223 p.
3. Gogelia A.A. Application of the finite element method for seismic micro zoning / Gogelia A.A., Napetvaridze S.H. // Seismic micro zoning. - Moscow: «Nauka», 1977. – P.161-164.
4. Gallagher R. Finite Elements Method. Fundamentals / Gallagher R. - Moscow: Mir, 1984. – 431 p.
5. Luco E.J. Three-dimensional response of a cylindrical crayon in a layered half-space / Luco E.J., Wong H.I., and F.C.P. de Barros // Earthquake Eng. Struc. Dynamics, V.19, 1990. - P. 799-817.
6. Aki K. Quantitative seismology. Theory and Methods / Aki K., Richards P. – V.2. – Trans. from EN – Moscow: Mir, 1983.
7. Horike M. Seismic response in three-dimensional sedimentary basin due to S-wave incidence / Horike M., Uebayashi H. and Takeuchi Y. // J. Phys. Earth, V.38, 1990. - P. 261-284.
8. Haskell N.A. Asymptotic Approximation for the Normal Modes in Sound Channel Wave Propagation / Haskell N.A. // J. Appl. Phys., V.22, 1951.- P.157-168.
9. Ratnikova L.I. Methods of seismic waves calculation in thin-layered media / Ratnikova L.I. - Moscow: Nauka, 1973. - 124 p.
10. Schnabel P.B., Lysmer J., and Seed H.B. 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, 1972. – 102 p.
11. Bardet J.P., Ichii K. and Lin C.H. EERA a Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. - University of Southern California, Department of Civil Engineering, 2000.- 40 p.
12. Alyoshin A.S. Seismic micro zoning of especially responsible objects / Alyoshin A.S. - M.: LLC "Svetoch Plus", 2010. – 293 p.
13. Voznesensky E.A. Kushnareva E.S., Funikova V.V. Nature and the laws of stress wave attenuation in soils / Voznesensky E.A. Kushnareva E.S., Funikova V.V. – Moscow: Flint Publisher, 2014. -104 p.
14. Pavlenko O.V. Seismic waves in the ground layers: a non-linear behavior of soil during strong earthquakes in recent years / Pavlenko O.V. - Moscow: Nauchnyi Mir, 2009. - 260 p.
15. Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering / Kramer S.L. // N.J., Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996. - 672 p.
16. Hardin B.O. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves / Hardin B.O., Drnevich, V.P. // Journal of the Soils Mechanics and Foundation Engineering Division. ASCE. - V.98, № SM7, 1972. - P. 667-692.

17. Ishibashi I. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay / Ishibashi I. and Zhang X. // *Soils and Foundations*, V.33, No.1, 1993. - P.182-191.
18. Simple shear testing of sensitive very soft offshore clay for wide strain range / [Lanzo G., Pagliaroli A., Tommasi P., Chiocci F.L.] // *Canadian Geotechnical Journal*, V.46. № 11, 2009. - P. 1277-1288.
19. Vucetic M. Effect of soil plasticity on cyclic response / Vucetic M., Dobry R. // *Journal of Geotechnical Engineering*. - V.117, 1991. - P. 89-107.
20. Seed H.B. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential / Seed H.B., Idriss I.M. // *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*. V.97, № SM9, 1971. - P. 1249-1273.
21. Joyner W.B. Calculation of nonlinear ground response in earthquakes / Joyner W.B., Chen T.F. // *Bull. Seism. Soc. Am.*, V.65, No.5, 1975. – P.1315-1336.
22. Martin P.P. MASH – a computer program for the nonlinear analysis of vertically propagating shear waves in horizontally layered soil deposits / Martin P.P. and Seed H.B. // *Report No. UCB/EERC-78/23*. - Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1978.- 96 p.
23. Dikmen, S. Effective Stress Analysis of Seismic Response and Liquefaction: Theory / Dikmen, S. and Ghaboussi, J. // *J. Geotech. Engrg.*, 110(5), 1984. - P.628–644.
24. Kokusho T. Dynamic deformation characteristics of soil and nonlinear response of ground / Kokusho T. // *Report no. 301*. Central Electric Research Institute, 1990. - P. 207-240.
25. Kokusho T. Dynamic characteristics of ground. Lecture: Analytical method of the interaction between ground and structure / Kokusho T. - *Tsuchito-Kiso*, 40 (4), 1992. – P.76-84.
26. Iwasaki Y. Strong Motion Records at Kobe Port Island / Iwasaki Y., Tai M. // *Special Issue of Soils and Foundations*, 1996. - P. 29-40.

Стаття надійшла до редакції 10.08.2015 р.